

**В.Г. Лисиенко
Ю.В. Крюченков**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ И ПРОИЗВОДСТВ**

ТОМ 3

Книга 1

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ,
ИНФОРМАТИКА И ДИАГНОСТИКА.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭНЕРГЕТИКА**

Екатеринбург
2017

УДК 669.041
ББК 34.314-5
Л63

Рецензенты:

директор по науке и технике научно-исследовательского института металлургической теплотехники – ВНИИМТ, профессор,
д-р техн. наук **Г. М. Дружинин**,
профессор кафедры «Информатики» Уральского государственного горного университета, профессор, д-р техн. наук **Б.Б. Зобнин**

Лисиенко, В. Г., Крюченков Ю. В.

Л63 Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 3. Кн. 1: Автоматизированное управление, информатика и диагностика. Технологические процессы и энергетика: монография / В. Г. Лисиенко. – Екатеринбург: ООО "Издательство УМЦ УПИ", 2017. – 855 с.

ISBN 978-5-8295-0531-8

Монография связана с современными, весьма актуальными проблемами совершенствования и повышения эффективности энерготехнологий и производств. На современном уровне эти проблемы подкрепляются развитием теоретических представлений и методов математического моделирования. В Т. 1 были рассмотрены основные положения интегрированного энергоэкологического анализа. Приведены методики сквозного энергетического и энергоэкологического анализа, рассмотрена теория тепломассообменных эффективностей, отражены современные методы математического моделирования. Представлена методология энерготехнологической электромагнитной совместимости, рассмотрена модель производственного процесса.

Во 2-м томе, кн. 1 монографии были рассмотрены способы совершенствования и повышения эффективности процессов в плавильных, нагревательных и термических печах и энергетических установках с использованием модельных и экспериментальных исследований.

В кн. 2, Т. 2, ч. 1 и ч. 2 монографии приведены материалы по параметрическому анализу тепловых режимов процессов тепломассообмена и конструктивным решениям в энерготехнологиях, в том числе при акустических воздействиях.

В настоящем Т. 3, кн.1 приведены данные по автоматизированному управлению, информатике и диагностике в технологических процессах и энергетике.

Все материалы монографии являются оригинальными, в большей части авторскими. Монография предназначена для проектных, исследовательских организаций и предприятий в области энерготехнологий. Полезна студентам и аспирантам вузов.

Библиогр.: 340 назв. Рис. 213. Табл. 37.

УДК 669.041
ББК 34.314-5

ISBN 978-5-8295-0531-8

ГЛАВА 18

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ИНФОРМАТИКА И ДИАГНОСТИКА. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭНЕРГЕТИКА

18.1. Введение. Исторические аспекты

Как уже отмечалось ранее, в Т. 1 монографии были рассмотрены основы интегрированного энергоэкологического анализа как теоретической базы совершенствования процессов и конструкций в энерготехнологиях.

В Т. 2, кн. 1 приведены материалы по новым способам в энерготехнологиях, модельным и экспериментальным исследованиям.

В Т. 2, кн. 2, ч. 1 и ч. 2 автор описывает уже практические способы совершенствования и повышения эффективности процессов применительно к энерготехнологиям, имея в виду, в первую очередь, плавильные, нагревательные и термические печи и установки, энергетические агрегаты и т. д., в максимальной степени опираясь на теоретические подходы, изложенные в Т. 1.

В частности, в Т. 2, кн. 1, были рассмотрены конкретные способы и конструкции повышения энергоэкологической эффективности с использованием как методов моделирования (как математического, так и физического), так и экспериментальных методов. Кн. 2, ч. 1 посвящена конкретным примерам совершенствования тепловых режимов и конструкций в условиях уже промышленных агрегатов.

В Т. 2, кн. 2, ч. 2 более детально рассмотрены специальные вопросы воздействия акустических колебаний на процессы пылеосаждения и различные процессы при разливке жидкого металла [18.1–18.4].

В Т. 3, кн. 1 (соответственно гл. 18 монографии) в развитие предыдущих материалов авторы представили разработки в области создания и совершенствования методов и средств управления, контроля, экспертных систем и диагностики.

Основное внимание уделено технологиям и высокотемпературным процессам.

В Т. 3, кн. 1 во Введении. Исторический аспект авторы привели обобщающие материалы, касающиеся гл. 18, по личному участию авторов и связанных с деятельностью их коллег (в том числе учеников) и предприятий в развитии методов и средств управления, контроля, экспертных систем и диагностики.

Отметим, что, как правило, в данных разработках авторы являлись руководителями проводимых работ или исполнителями. В основном рассматриваемые процессы относятся к высокотемпературной области: это металлургия, машиностроение, промышленность строительных материалов, энергетика, а также ряд других областей промышленности, технологий и транспорта.

Данная гл. 18, Т. 3, кн. 1 является развивающей авторский много томник «Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств».

Многие материалы данной главы, относясь, как выше было сказано, к высокотемпературной области связаны с теплофизическими процессами и результатами, опирающегося на эти процессы математического моделирования.

При этом авторские с коллегами разработки в области автоматизации во многом относятся к так называемым «верхним» уровням управления, связанным с вопросами оценивания, идентификации и оптимизации, включая и «супер» уровень – имитационно-оптимизирующий уровень, опирающийся на самое современное математическое моделирование (см. п. 2). Вопросы математического моделирования были детально рассмотрены в Т. 1 настоящего издания [18.1]. В ряде материалов данной главы представлены также разработки авторов с коллегами методов измерения, экспертных систем, систем диагностики и в некоторых случаях и локальных САР. Что касается систем управления, которые могут быть условно отнесены к «типовым» и методов ТАУ – теории автоматического управления, то они в достаточной мере отражены в имеющейся известной многочисленной литературе, в том числе и учебной (см., например, [18.5–18.14])

В. Г. Лисиенко уже при обучении на металлургическом факультете УПИ (УрФУ) на кафедре металлургических печей (в дальнейшем кафедра теплофизики и информатики в металлургии), вплотную приобщался к решению ряда проблем контроля и автоматизации.

Курс автоматики на кафедре читал выдающийся инженер, зам. директора Уралчерметавтоматики М.В. Шавельзон. При этом большое внимание он уделял не только практическим вопросам, но и теории автоматического управления, Один лист в дипломном проекте автора был посвящен системе управления, и эту часть проекта как раз консультировал М.В. Шавельзон. Заведующий кафедрой Б.И. Китаев читал студентам созданные им курсы «Теплотехнические основы автоматики доменного и сталеплавильного процессов».

По заданию М.В. Шавельзона, во время практики на Магнитогорском металлургическом комбинате автор разрабатывал систему автоматизации и, в частности, систему контроля пламени сталеплавильных большегрузных печей с использованием фотоэлементов.

В дальнейшем во время уже работы на металлургическом факультете (в том числе под руководством Б.И. Китаева и Н.И. Кокарева) автору очень часто в исследованиях на высокотемпературных печах и агрегатах приходилось применять самые разнообразные средства контроля и диагностики (измерение температуры пламени и тепловых потоков, газовый анализ, обратный тепловой баланс и т. д.). Этот исследовательский материал подробно описан в монографии [18.2], а также в [18.15–18.26]. Вопросам температурных измерений отдельно посвящены справочные издания и учебные пособия [18.27; 18.28], в которых В. Г. Лисиенко являлся и соавтором и редактором.

Определенной вехой в приобщении к теоретическим и практическим вопросам управления было участие В. Г. Лисиенко (совместно с Б.И. Китаевым) в работе симпозиума ИФАК (Symposium IFAC), проходившем в Праге в 1967 г. Симпозиум был посвящен проблеме становления важнейшего раздела автоматизированного управления – теории идентификации. Руководителем советской делегации был Н.С. Райбман, известнейший ученый в области идентификации, получивший Государственную премию (с соавторами) за разработку и внедрение систем управления с подсистемами идентификации на прошивочном трубном стане Первоуральского новотрубного завода [18.14; 18.42]. На самом же симпозиуме состоялось знакомство с выдающимися учеными в области управления и прежде всего со всемирно известной школой Н.Н. Красовского (Ю.С. Осипов, А.Н. Куржанский), а также с Б.Н. Петровым, М.В. Мееровым, В.И. Гурманом, А.С. Куликом и с американским ученым Э. Полаком,

болгарским ученым М.Б. Ходжийски. Большую роль в дальнейшей работе сыграло знакомство и последующие тесные контакты с выдающимся автоматчиком В.Я. Ротачем, который кстати на этом симпозиуме проводил дополнительный авторский семинар с энергетиками по идентификации.

С Н.С. Райбаном и В.Я. Ротачем В. Г. Лисиенко встречался и на семинаре автоматчиков в г. Новокузнецке, организованном выдающимся автоматчиком, лауреатом Государственной премии в области управления В.П. Авдеевым.

Н.С. Райбман лично проконсультировал по проблеме автоматизации теплового режима на кольцевой нагревательной печи ПНТЗ (см. п. 18.8).

Кстати, В.П. Авдеев защитил свою докторскую диссертацию в диссертационном совете металлургического факультета, председателем которого В. Г. Лисиенко был в течение 10 лет. На этом же совете успешно защитил докторскую диссертацию по автоматизации агломерационного процесса и ряд выдающихся теплофизиков и автоматчиков.

Большое количество работ по специальностям «Математическое моделирование», «Автоматизация и САПР» было защищено уже на диссертационном совете радиотехнического факультета, председателем которого после перехода на этот факультет был также В. Г. Лисиенко в течение почти 30 лет.

Работая на кафедре металлургических печей доцентом, а затем и профессором, В. Г. Лисиенко читал курсы лекций по промышленной электронике, а главное, по автоматике и автоматизации технологических процессов (для металлургов и химиков).

В 1982 г. В. Г. Лисиенко был избран заведующим кафедрой аппаратуры автоматического управления (в дальнейшем кафедра автоматики и управления в технических системах, а с 2012 г. – кафедра автоматики). На радиотехническом факультете (в настоящее время Институт радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ) и проработал в этой должности 30 лет (до 2012 г.). В настоящее время профессор кафедры автоматики. При этом был использован весь задел в области промэлектроники и автоматического управления с дальнейшим развитием этого важнейшего направления, но уже в более широком аспекте применения в высокотемпературных

энерготехнологиях (металлургия, машиностроение, энергетика, промышленность строительных материалов, включая и оборонную промышленность).

Удалось сконцентрировать работу всего коллектива кафедры по развиваемому автором научному направлению: «Управление и интенсификация высокотемпературных энерготехнологических процессов на основе математического моделирования, интегрированного энергэкологического анализа, экспертных и информационных систем».

Постоянно поддерживались контакты с Сибирской школой автоматчиков, лично знаком с основателем этой школы заведующим кафедрой П.М. Масловским (даже проводил, по поручению М.А. Глинкова, председателя методического совета Минвуза СССР по теплофизике и автоматике, своеобразную «инспекцию» этой кафедры). Известны имена его учеников и последователей, в их числе уже упоминавшиеся В.П. Авдеев, Л.П. Мышляев, В.П. Цымбал и др. С В.П. Цымбалом автор поддерживает постоянные контакты, особенно в области развиваемого В.П. Цымбалом направления: управление и синергетика в металлургии.

Отметим также создание и успешную работу под научным руководством В. Г. Лисиенко Научно-исследовательского института (сейчас Центра) проблем энергосбережения и автоматизации (директор Ю.К. Маликов), проводящего исследования и разработки в области автоматизации, отопления зданий инфракрасными излучателями, вентиляции цехов и шахт и т. д.; в тесном сотрудничестве с НПП «Газ-инжиниринг».

В проведении исследований и разработках авторы с соавторами сотрудничали с целым рядом предприятий, руководство и сотрудники которых проявляли заинтересованность и оказывали помощь и поддержку, среди них отметим, как и ранее Северский трубный и Первоуральский новотрубный заводы, металлургический завод им. А.К. Серова, ВСМПО, Магнитогорский и Нижне-Тагильский металлургические комбинаты, Верх-Исетский металлургический завод, Каменск-Уральский металлургический и алюминиевый заводы, УГМК, Средне-Уральский и Красноуфимский медеплавильные заводы, Уралвагонзавод, п/я 500, Качканарский, Лебединский, Михайловский, Соколовско-Сарбайский (Казахстан) ГОКи, целый ряд

рудных шахт, комбинат «Эрдэнэт» (Монголия), завод «Хомутово» (Чехия), предприятие «Промавтоматика» (Грузия), Соликамский УГК, ОАО «Хромпик», Тюменская ТЭЦ-2, Богословский алюминиевый завод и др.

На всех этапах творческой работы автора огромная помощь была оказана руководством и коллективом Всесоюзного научно-исследовательского института-ВНИИМТ – ныне НИИ металлургической теплотехники. Отметим директоров А.И. Чарушникова, В.А. Бабошина, Л.А. Зайнуллина, зам. директоров А.В. Кавадерова, А.И. Дружинина, директора опытного завода Н.А. Розинцева, И.В. Белова, А.И. Черногорова, А.С. Невского, Ф.Р. Шкляра, А.В. Арсеева, В.К. Карпушина, Б.Н. Курочкина, А.П. Буткарева, А.А. Буткарева, Ю.А. Самойловича, Т.А. Низовцеву, Ю.И. Ляпунова, В.И. Маслова и многих других.

Определенные взаимоотношения сложились с НПО автоматики. Так Н.В. Ладыгина (Соловьева) успешно защитившая под руководством В. Г. Лисиенко кандидатскую диссертацию в области математического моделирования возглавила отдел на НПО автоматики, продолжая работать по совместительству на кафедре. Под руководством автора работала над кандидатской диссертацией сотрудница НПО автоматики А.А. Соколова.

Связи с НПО автоматики реализуются и в рамках Регионального Уральского отделения АИН им. А.М. Прохорова, благодаря заключенному договору о творческом сотрудничестве. В настоящее время связи с НПО автоматики проходят и по линии учебного процесса в связи, как отмечалось, с объединением сектора «Автоматика» и кафедры автоматики и управления в технических системах в рамках кафедры автоматики в 2012 г.

Отметим также творческие связи и сотрудничество с автоматчиками и теплофизиками целого ряда организаций: Магнитогорского государственного технического университета (Н.Б. Гольденберг, Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Х. Девятков и др.), Московского национального исследовательского технологического университета-МИСиС (М.А. Глинов, В.А. Кривандин, В.А. Роменец, Ю.С. Юсфин, Б.С. Мاستрюков, А.М. Беленький, В.А. Арутюнов, А.Е. Пареньков, З.Г. Салихов, Л.А. Шульц, И.А. Прибытков, В.А. Кривоносов, Г.С. Сборщиков), Московско-

го вечернего металлургического университета (Г.М. Еланский, А.Г. Зеньковский, Г.М. Глинов), Уральского государственного горного университета (Б.Б. Зобнин), Уральского государственного лесотехнического университета (А.В. Мехренцев, С.П. Санников, А.И. Бабин, Г.Г. Ордуянц, В.П. Чусовских, А.Б. Бессонов), Пензенского политехнического университета (А.А. Черный, В.А. Грачев), Новоуральского технологического института НИЯУ МИФИ (П.А. Дюгай), Южно-Уральского национального исследовательского университета (Л.С. Казаринов, Е.В. Торопов, В.И. Панферов, В.В. Крымский), Уральского педагогического университета (В.Г. Житомирский, Л.И. Миронова), Саратовского политехнического университета (В.М. Седелкин, Э.М. Малая), Московского архитектурного университета (Ю.А. Суринов), Самарского политехнического университета (Г.И. Арончик – впоследствии работавший в США в Институте технологий газа, А.В. Темников, Г.Г. Панкова, Н.В. Дилигенский, А.И. Щелоков), Краснодарского политехнического университета (В.М. Меленьцев, И.Г. Хрещик), СПб (Ленинградского) государственного инженерно-экономического университета (А.С. Иссерлин, в настоящее время видный теплотехник и экономист в ФРГ, М.И. Певзнер), Московского экономического университета (Р.Б. Ахмедов), Центрального котлотурбинного института-ЦКТИ (А.Г. Блох, долгое время являлся председателем научно-технического совета по математическому моделированию и управлению при Госкомитете по науке и технике СССР, членом которого являлся и автор и еще много коллег, в том числе отмеченных в настоящем издании), Ленинградского электротехнического университета-ЛЭТИ (В.Б. Яковлев), Уральского института металлов (Л.А. Смирнов, В.А. Ровнушкин и др.), Институтом металлургии УрО РАН (Л.И. Леонтьев, А.Н. Дмитриев, В.Ф. Балакирев), Институтом машиноведения УрО РАН (В.П. Чистов, В.М. Макаров), АО НПО автоматики (Л.Н. Шалимов, Н.В. Соловьева, В.В. Телицин, Н.В. Дудин), Уральского филиала ЗАО РтСофт (Е.Э. Страшинин, А.В. Малов, В.С. Кудрявцев), ЗАО РтСофт (С.В. Андрианов, О.В. Синенко, Н.А. Куцевич), НПО «ФАН» (А.А. Филиппенков, М.М. Тельминов, А.В. Войтенко, В.А. Войтенко), Институтом проблем управления РАН (Н.С. Райбман, Б.Н. Четверушкин, Е.Б. Иванов), НПО «Торекс» (Г.М. Майзель, А.П. Буткарев, А.В. Старо-

думов), Космического Центра им. М.В. Келдыша (Л.Е. Агуреев), ООО «Прософт» (А.В. Мяков), ОАО «Перол» (А.П. Лях, А.П. Шадрин), Издательство «Теплотехник» (М.Г. Ладыгичев), Институтом ВНИПИЧерметэнергоочистка (А.Э. Клекль, С.Д. Дрейзен-Дудченко), Институтом НИИЭнергоцветмет (Л.Н. Бажанов, В.К. Карпушин, Г.Ф. Стрижов), институтом «Стальпроект» (А.Б. Усачев, В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц), институтом ВНИИНефтемаш Ю.Д. Ханин), ОКБ ИВТАН РАН Л.Т. Хамяляйнен, Г.И. Масленников), институтом ВНИИЭТО (Г.К. Рубин), Институтом ВНИПИГаздобыча (В.М. Седелкин), Уралгипрометом (В.И. Легонький).

В течение ряда лет поддерживалось тесное сотрудничество с издательством «Теплотехник» (М.Г. Ладыгичев), в результате чего было издано при авторстве и редактировании большое количество справочных изданий и монографий, в которых отражены многие материалы по контролю, диагностике и автоматизации [18.20–18.21; 18.26–28].

Большие связи существуют с ассоциацией «Ростепломонтаж» (председатель Ю.П. Сторожков). Совместно с этой ассоциацией и при её организации проведено четыре международных конгресса, научным руководителем которых был В. Г. Лисиенко.

Нельзя не отметить участие В. Г. Лисиенко в качестве вице-президента Академии Инженерных наук им. А.М. Прохорова и Президента его Регионального уральского отделения в работе Академии Инженерных наук и его Президиума, возглавляемой Нобелевским лауреатом А.М. Прохоровым, а затем лауреатом Государственных премий Ю.В. Гуляевым, очень часто при этом поднимались и решались проблемы управления, причем самой современной технологии.

В течение 10 лет был членом экспертного совета ВАК в области металлургии по направлению: автоматизация технологических процессов и производств (совместно с Г.М. Глинковым). Большое количество работ в области автоматики в рамках всей страны было прорецензировано лично автором.

Из зарубежных стран отметим прежде всего США. В частности, определенный опыт в области контроля и управления высокотемпературными печами получен (совместно с Г.К. Маликовым) во время длительных командировок и работе на опытной печи СФО в Чикаго (США), оснащенной самой передовой измерительной и

автоматной техникой, с Институтом технологий газа (Gas Technology Institute) – Я. Чудновский, А. Козлов, Г. Курек, М. Хинкис, Дж. Вагнер и др. [18.2; 18.3]. Большая помощь и поддержка оказана профессором школы инженеров-механиков Пурдье университета (School of Mechanical Engineering Purdue University West-Lafayette) Р. Вискантой. В. Г. Лисиенко 6 месяцев проходил под его руководством и при сотрудничестве стажировку в этом университете как посещающий ученый (Visiting Scholar).

Творческие связи в США установились также с предприятием Innovation and Goods (М. Глазман, Коламбус), National Innovation Center (М. Шамбан, Дейтройт), а также с председателем Чикагского НТЦ РУО АИН им. А.М. Прохорова Б. Майданчиком (Чикаго).

Возглавляя кафедру аппаратуры автоматического управления с 1982 г., с 1992 г. кафедру автоматики и управления в технических системах, автор большое внимание уделял совершенствованию учебного и научного процесса. Подробно эта деятельность, как и работа всей кафедры, освещена в учебных пособиях, изданных автором в соавторстве с Е.Н. Виноградовым, В.М. Романовым, О.А. Гусевым [18.29–18.31].

Отметим выпуск инженеров по очной, заочной и ускоренной формам, организацию подготовки специалистов в филиалах г. Верхней Салде и в г. Краснотурьинске, переход на подготовку бакалавров и магистров (с 2009 г.) по направлению «Управление в технических системах».

Кстати первоначально подготовка специалистов в филиале г. Верхней Салды в большой мере была связана с испытанием на полигоне в Нижней Салде двигателя «Энергия» для космического корабля многоразового использования «Буран» (беспилотного, оснащенного самой передовой автоматикой). Конечно, одновременно и в настоящее время проходит подготовка специалистов-автоматчиков для «титановой магнитки», «титановой долины» – Верхне-Салдинского металлургического производственного объединения – ВСМПО-АВИСМА.

В г. Краснотурьинске подготовка автоматчиков шла в основном для Богословского алюминиевого завода – БАЗа.

Работая проректором УПИ по научной работе (с 1979 по 1988 гг.), В. Г. Лисиенко значительное внимание уделял развитию исследо-

ваний в области автоматизации. Так была создана лаборатория робототехники на механико-машиностроительном факультете, большое внимание уделялось работам оборонного значения на радиотехническом, физико-техническом, химико-технологическом факультетах.

В частности, на физико-техническом факультете был запущен в работу полностью автоматизированный ускоритель частиц «Микротрон», с использованием которого проводилось исследование работы электронной аппаратуры в экстремальных условиях и ускоренный анализ химического состава материалов, в частности золотосодержащей руды.

На химико-технологическом, металлургическом и физико-техническом факультетах были созданы межвузовские лаборатории, оснащенные самой передовой приборной базой.

Аспирантура и докторантура включала две специальности: «Автоматизация технологических процессов и производств» и «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Были разработаны и прочитаны новые учебные курсы: «Введение в специальность», «Идентификация и диагностика систем» (читается в настоящее время для бакалавров совместно с В.В. Еголаевым), «Управление и информатика в энергосбережении и экологии», «Математическое моделирование объектов и систем управления», «Идентификация и управление в сложных саморегулируемых системах», «История и методология науки и техники (в области автоматизации)» – магистерские курсы.

Курс «Управление и информатика в энергосбережении и экологии» внедрен при авторском участии в Уральском государственном лесотехническом университете и Новоуральском технологическом институте Московского ядерного университета-МИФИ.

В рамках этих курсов был создан с участием и часто под редакцией В. Г. Лисиенко целый ряд учебных пособий (с грифом Регионального отделения УрФО УМО по образованию) [18.32–18.39; 18.41–18.48].

Учебный процесс на кафедре тесно сочетался с проводимыми научно-исследовательскими работами в области контроля, диагностики и автоматизации, которым в основном и посвящена данная глава.

Отметим, что целый ряд вопросов управления, в том числе автоматизированного, диагностики и контроля затронуты в контексте

с излагаемым материалом в предыдущих томах и книгах данного издания [18.1–18.4]: анализ оптимального управления в триадном критерии «энергия, экология, капитальные затраты»; задачи управления и оптимизации в системе «печь – теплообменный аппарат»; уровни автоматизированного управления и теория детерминированного регулятора; модели управления в категориях эффективности производственной деятельности [18.1]; построение математических моделей и определение энергетических характеристик энерго-технологических агрегатов; измерение температур факела и поверхностей и тепловых потоков [18.2; 18.3]; параметрический анализ и тепловые режимы процессов тепломассообмена; автоматизированное факельно-импульсное отопление [18.3]; комбинированная акустико-аэродинамическая защита объективов теплового контроля [18.4]; структура имитационно-оптимизирующего комплекса в процессах нагрева, и результаты расчетов оптимизации распределения расхода топлива по зонам нагревательной печи (для условий Оскольского электрометаллургического завода) [18.2]; процедура выбора представительных точек установки датчиков температуры в методической печи [18.2]; система управления тепловым режимом в проходных нагревательных печах [18.2]; автоматизированная система управления нагрева металла при изменении производительности [18.2]; переходный процесс при нагреве металла в проходных нагревательных печах [18.2]; статические характеристики при нагреве трубной заготовки в секционной печи [18.2]; система диагностики топки паровых котлов [18.2]; автоматизированное управление при импульсном отоплении [18.2]; температурная диагностика непрерывного слитка [18.2]; режимы управления нагревом трубной заготовки в секционной нагревательной печи [18.2].

Из республик бывшего СССР (в настоящее время это самостоятельные государства в рамках СНГ) отметим имеющиеся связи и взаимодействие с Институтом газа АН Украины (Б.С. Сорока, А.Е. Еринов), Институтом автоматики Украины (А.Л. Гончаров, Л.Л. Прядкин, И.М. Резник), Днепропетровской металлургической академией Украины (В.Н. Губинский, М.В. Губинский, Л.П. Грэгс, А.О. Еремин), Опытным заводом ИЭС им. Е.О. Патона (Б.Ш. Статников, М.П. Жадкевич, А.А. Ищенко). Кстати, в 2013 г. В. Г. Лисенко удостоился избрания Почетным профессором этой академии.

Также следует отметить Запорожскую техническую академию Украины (М.П. Ревун, В.А. Ширинкин, Г.М. Рыжков, Г.М. Барахтенко), Институтом черной металлургии Украины (И.И. Кобеза).

Имели место творческие связи с О.Э. Шлихом, ранее взаимодействующий с заводом «Азовсталь» (Украина), а в настоящее время возглавляющий фирму ACCUSTEEL в Израиле.

Творческие связи поддерживались с Таллиннским политехническим институтом (И.Р. Микк) и Институтом физико-технических проблем энергетики (М.М. Тамонис) в Литве.

В Белоруссии имело место сотрудничество с Белорусским национальным техническим университетом (А.П. Несенчук, В.Б. Ковалевский, В.И. Тимошпольский – ранее работавший в Днепродзержинском политехническом институте, В.П. Трофимов, Ю.А. Малевич и др.).

С грузинской организацией «Промавтоматика» проводились совместные работы в г. Первоуральске на ПНТЗ и на заводе «Хомутово» в Чехии (Д.А. Бодалов, А.М. Кюрсан).

На Валмиерском заводе стекловолокна (Латвия) велись работы по совершенствованию тепловой работы стекловаренных печей (И.Я. Поляк, А.А. Зейбот, Т.Я. Данцис).

Из дальнего зарубежья следует отметить Хейлуджанскую АН КНР (В.В. Ду, Ц.Х. Гао), «Металлургпроект» в Болгарии (А.Н. Златарский), ФРГ «Рургаз» (А.С. Иссерлин), завод «Эрдэнэт» в Монголии (магистры, защитившие диссертации под руководством В. Г. Лисиенко И. Хурэлчулуун, Д. Юндэндорж, О. Цогтбаатар).

В рамках международной ассоциации «Знание», возглавляемой ее президентом, академиком Е.М. Малитиковым, членом исполкома которого является автор, на международном уровне также часто вопросы управления находили свое отражение. Участие в этой организации позволяет поддерживать творческие связи с представителями стран СНГ и рядом зарубежных стран.

Проведение исследований и разработок в области контроля, диагностики и автоматизации проводилось с участием и помощью целого ряда наиболее близких сподвижников и соратников авторов (в том числе аспирантов и докторантов): Г.К. Маликова, Ю.К. Маликова, А.В. Саплина, Д.Л. Лобанова, В.В. Волкова, Я.М. Щелокова, С.Е. Розина, В.Б. Кутьина, Л.Е. Суханова, Ю.Н. Овчинникова, А.Е. Паренькова, В.П. Чистова, Н.П. Лоншакова, А.С. Иссерли-

на, О.Н. Брюханова, С.Н. Гущина, М.Д. Казяева, Б.Б. Зобнина, Г.В. Воронова, Ю.А. Крюченкова, Б.А. Фетисова, С.Л. Гольдштейна, Е.А. Коршунова, Е.М. Шлеймовича, С.П. Санникова, В.К. Карпушина, В.А. Ширинкина, С.Е. Щеклеина, В.И. Кузякина, Н.И. Хухарева, Т.П. Рыжовой, Е.С. Левина, Б.С. Балабанова, В.В. Бондаренко, И.Ю. Медведева, О.А. Гусева, А.П. Скуратова, С.Д. Скуратовой, С.В. Грищенко, Ю.А. Журавлева, А.Л. Гончарова, А.Л. Засухина, Б.С. Глазырина, Т.В. Лобановой, Ф.Н. Сарапулова, С.П. Бурмасова, С.А. Загайнова, В.М. Лупэйко, В.Т. Луценко, Э.В. Богдановой, В.Н. Шилова, Е.Э. Страшинина, И.В. Давиденко, В.П. Голубева, Н.С. Калинина, Ю.Н. Чеснокова, А.В. Лаптевой, В.Н. Круглова, О.Г. Трофимовой, Н.В. Соловьевой, В.А. Морозовой, Н.Я. Дзюзера, А.П. Буткарева, А.А. Буткарева, В.И. Паутова, В.Б. Щербатского, А.А. Старостина, Н.А. Чусовитина, А.Е. Востротина, А.А. Константинова, Н.Н. Пономарева, М.Н. Спирина, В.В. Муханова, Н.И. Вернова, Е.Н. Виноградова, Н.И. Баранова, В.С. Старикова, А.С. Козлова, Т.Н. Низовцевой, В.Д. Баранова, Л.Г. Грувермана, Ю.А. Левченко, Л.И. Мироновой, А.Н. Берегового, В.Н. Толмакова, Ф.Л. Скуридина, Е.Б. Иванова, Л.Е. Агуреева, В.Г. Воронцова, В.В. Еголаева, В.А. Матвиенко, А.В. Матвиенко, А.Ю. Ташкинова, В.М. Кормышева, Е.Ю. Старцевой, А.Г. Бабенко, О.Е. Кириллова, В.С. Кудрявцева, А.В. Малова, К.А. Сурганова, С.А. Зотова, А.В. Сучкова, А.В. Стародумова, Т.С. Кирилловой, Е.Ю. Воронцова, В.П. Зайцева, Д.В. Завгороднева, М.В. Никифоровой, Р.М. Долгого, В.В. Попова, А.А. Соколовой, С.А. Шлеенкова, Д.А. Анисимова, А.А. Титаева, С.Г. Супрунова, И.В. Зотова, В.С. Третьякова, А.В. Васильева, В.В. Сонича и ряда других.

Отметим, что в связи с очень большим количеством публикаций по рассматриваемым проблемам, как и в предыдущих главах, основные ссылки в тексте сделаны на монографии, учебные пособия и патенты. Что касается статей и докладов, то отмечены в основном приоритетные и наиболее значимые (с позиции автора) материалы. В то же время старались в тексте акцентировать внимание на авторов технических решений и соответствующих публикаций. При этом учитывалось, что в цитируемых материалах, конечно же, приводятся подробные ссылки на соответствующие многочисленные публикации.

Авторы приносят глубокую благодарность за постоянную помощь при решении задач контроля и автоматики: заведующим кафе-

дрой теплофизики и информатики в металлургии Ю.Г. Ярошенко и Н.А. Спирина, заведующему кафедрой металлургии чугуна и стали С.А. Загайнову, заведующему кафедрой металлургии стали и сплавов С.Г. Братчикову, заведующему кафедрой энергосбережения Н.И. Данилову и всему коллективу Института металловедения и металлургии.

Большая помощь и поддержка оказана всем коллективом кафедры автоматики и управления в технических системах (в настоящее время кафедра автоматики).

Большая признательность Научно-исследовательской части УрФУ и лично С.В. Карелову, С.В. Устелемову и Ж.В. Волосниковой, а также редакционно-издательскому отделу УрФУ И.Ю. Плотниковой и Н.П. Кубыщенко.

Большая благодарность директорам Института радиоэлектроники и информационных технологий-РТФ С.Т. Князеву и С.Н. Шабунину, заместителю директора О.А. Гусеву и всему коллективу института.

Огромная благодарность ректору университета В.А. Кокшарову, бывшему ректору и президенту университета С.С. Набойченко и всему коллективу УрФУ.

18.2. Трехуровневые АСУ ТП (ТС) и сложные объекты с распределенными параметрами

В данном параграфе изложены основные принципы построения иерархической структуры в представлении автора [18.1; 18.32; 18.33; 18.36; 18.39; 18.45]. Конечно, основой этого представления являются развиваемые в работах автора автоматизированные системы управления технологическими процессами (транспортными средствами) АСУ ТП (ТС) и, в частности, представление о трехуровневых АСУ ТП – ТАСУ ТП.

18.2.1. Развитие и структура ТАСУ ТП

Развитие АСУ ТП

Системы управления технологическими процессами АСУ ТП (ТС) на современном уровне развития характеризуются все большей насыщенностью микропроцессорной и вычислительной техникой. При этом следует учесть, что технологические процессы

представляют собой весьма сложные объекты с распределенными параметрами, работающие и требующие управления в динамических режимах. Для таких объектов часто требуется достаточно полное представление о полях параметров состояния, выявление максимальных и минимальных величин, их представительное осреднение. Причиной нестационарности полей параметров состояния часто являются гибкие условия производства: переменные (заказные) производительность (темп) и качество (сортамент) продукции, а также и нестабильность поступающего сырья. До сравнительно недавнего времени вследствие сложности протекающих процессов автоматизированное управление такими процессами сводилось к локальным системам автоматического регулирования в их различной постановке (регулирование по отклонению, регулирование с компенсацией по возмущению, связное, программное и комплексное регулирование и т. д.).

Следующий уровень совершенствования автоматизированного управления такими системами связан с применением управляющих и вычислительных электронных машин (УВМ), работающих в реальном времени. Этот уровень и характеризует создание собственно АСУ ТП. Как отмечено ниже, основные функции УВМ в приложении к объектам с распределенными параметрами сводятся к ведению процесса по оптимальным траекториям, проведению процедур оценивания и идентификации.

Следует отметить, что в последнее время возможности ЭВМ существенно расширились. Это позволяет ставить задачи развития третьего (имитационно-оптимизирующего) уровня управления, в результате чего и формируется структура так называемых (по предложению автора) трехуровневых систем управления технологическими процессами – ТАСУ ТП [18.32]. Этот самый верхний третий уровень связан с обеспечением возможности компьютерной поддержки АСУ ТП на различных этапах ее функционирования, начиная от разработки проекта и кончая созданием систем искусственного интеллекта и экспертных систем для обеспечения процесса эксплуатации системы в оптимальных режимах.

Важнейшей функцией верхнего уровня является функция «советчика» в управлении технологическими процессами и определение стратегии их оптимизации (оценка оптимальных траекторий). При этом уже используются довольно сложные математические

модели процессов в их комбинированной детерминированно-стохастической постановке. В частности, применительно к управлению процессами нагрева материала используется обобщенный подход в приложении к объектам с распределенными параметрами, разработан и используется обобщенный термодинамический зонально-узловой метод (ДЗУ-метод) [18.1].

Еще более сложные задачи возникают при управлении высокотемпературными, в частности, пирометаллургическими процессами, в которых развиваются сложные физико-химические процессы в сочетании с теплообменом, гидродинамикой и т. д. При этом количество контролируемых параметров достигает 500 и более.

Практика показывает, что использование при этом сложных математических моделей также возможно в режимах третьего уровня: в режиме стратегического советчика – при проектировании и наладке систем управления, при оценке аварийных ситуаций и т. д. В режиме тактического советчика – реального времени, целесообразно использование нечетких управляющих моделей и противоаварийных экспертных систем, работающих в комплексе с системами обработки информации (СОИ). Последние опробованы в качестве тренажеров на ряде заводов.

Развитие третьего уровня АСУ ТП и создание трехуровневых систем (ТАСУ ТП) обеспечивают новые широкие возможности функционирования автоматизированной системы управления, делают саму систему более надежной и живучей, создают предпосылки для повышения эффективности технологических процессов и обеспечения гарантированного качества (сертификации) продукции. Типичным примером непрерывных технологических процессов с распределенными параметрами являются процессы нагрева материалов, осуществляемые в нагревательных устройствах, построенных по проходному типу, т. е. включающие движущийся теплоноситель и нагреваемый материал. Такого рода устройства получили широкое распространение в различных отраслях промышленности: в металлургии и машиностроении (например, для нагрева металла под прокатку и ковку и для термообработки), в сушильных и обжиговых устройствах, в установках для выращивания кристаллов, в различного рода теплообменных и энерго-технологических агрегатах. При этом в технологическом плане ставится задача нагрева до заданных температур за определенное время (при задании производитель-

ности), обеспечения требуемой равномерности нагрева, снижения угара металла. Для металлургических окатышей требуется обеспечение достаточной прочности и других технологических свойств, требуется и минимизация расходов на технологический процесс: снижение капитальных затрат и экономия материальных и энергетических ресурсов. Подобного рода устройства представляют собой сложные динамические системы с распределенными параметрами, локальное регулирование в которых осуществляется в нескольких технологических зонах. Обычно в таких устройствах реализуется и гибкая технология, т. е. основным возмущающим воздействием в таких объектах обычно является изменение производительности агрегата (изменение темпа процесса). Это связано с различным сортаментом и качеством материала, количественной характеристикой заказов, частыми остановами и пусками при переналадке режимов. Таким образом, понятие «температура нагрева» в этом случае включает в себя все сложные условия гибкой технологии нагрева. В этих условиях основной задачей АСУ нагревом является обеспечение заданной точности нагрева (конечные среднемассовая температура и перепад температур по сечению заготовки) при минимизации удельных расходов топлива с рядом ограничений (по окалинообразованию, по стойкости кладки, по трещинообразованию, по прочности и т. д.), т. е. обеспечение поддержания оптимальных тепловых режимов. Вследствие большой распространенности и технологической значимости подобного рода устройств – типичных представителей объектов с распределенными параметрами – создание трехуровневых АСУ применительно к ним является актуальной задачей. В работах [18.32; 18.33; 18.36; 18.39; 18.45] формулированы основные функции, реализуемые имитационно-оптимизирующим контуром управления объектами с распределенными параметрами, предложен вариант обобщенной переносной модели технологических процессов, продемонстрировано применение этого подхода, обобщен имеющийся опыт применения имитационно-оптимизирующего контура управления на примере ряда АСУ, в частности, АСУ нагревом материала, как в статической, так и в динамической постановке.

Конкретные примеры создания и функционирования АСУ ТП, в том числе ТАСУ ТП, развиваемые в работах под руководством автора, приведены в дальнейших параграфах данной главы.

Основные принципы построения ТАСУ ТП

Таким образом, основные принципы построения трехуровневых АСУ ТП (в дальнейшем ТАСУ ТП) основаны, с одной стороны, на тенденции развития интеллектуального уровня современных АСУ ТП, а с другой, – на все расширяющихся возможностях управляющей и вычислительной техники.

В самой иерархии построения ТАСУ ТП сохраняется исторически прослеживаемая последовательность перехода от простого к сложному – от обычных локальных следящих САР к современным интеллектуальным САУ (рис. 18.1).

На нижнем уровне ТАСУ ТП находятся локальные САР, обеспечивающие стабилизацию важнейших параметров технологических процессов во всех технологических зонах объектов. На этом уровне могут реализовываться разнообразные виды локальных САР: следящие, по отклонению, с компенсацией по возмущению (инвариантные), связные, с коррекцией, комплексные, многомерные и т. д.

Второй уровень управления является важнейшим показателем перехода от локальных САР к АСУ ТП – он характеризуется наличием элементов, позволяющих в режиме реального времени выполнять основные «автоматные» функции АСУ ТП: оценивание, идентификацию и оптимизацию режимов технологических процессов, т. е. осуществлять тактическое управление процессом.



Рис. 18.1. Иерархическая структура построения трехуровневых ТАСУ ТП в соотношении со структурой моделей и техническими средствами управления

При определении роли второго («верхнего») уровня управления и связанного с этим понятием АСУ ТП следует учитывать те функции, которые отводятся данному уровню. Авторы считают, что эти функции, как это сложилось в имеющейся практике, следует разделить на две категории.

К первой категории, которую можно определить как информационно-измерительную, относится большинство действующих в настоящее время АСУ ТП. При этом САУ оснащается компьютерной базой, функцией которой в основном является отображение информации и различные вспомогательные функции – противоаварийная защита, программное управление и т. д.

Ко второй категории, которую авторы считают интеллектуальной и обеспечивающей резкое повышение качества и надежности управления, относятся АСУ ТП (АСУ ТС), в которых задатчики локальных САР связаны с УВМ, а УВМ выполняют по крайней мере одну из трех важнейших функций, отмеченных выше: оценивание, идентификация и оптимизация при управлении. В этом случае в наибольшей степени проявляется роль математического моделирования, в том числе и в рамках имитационно-оптимизирующего уровня. Именно развитию этой категории (АСУ ТП-Ф) уделено внимание в данном издании.

На рис. 18.2 представлена структурная схема данной АСУ ТП, из которой отчетливо видна главная роль УВМ. На рис. 18.3 приведена функциональная схема АСУ ТП-Ф. Авторы считают, что в данной интерпретации АСУ ТП пионером был У. Рей [18.10] и данную схему часто представляет как «схема Рея». Однако авторы совместно с В.В. Волковым внесли определенные дополнения и уточнения в эту схему, например, добавлен блок прогнозирования, уточнены некоторые связи и т. д. Детальное описание представленных схем и функций отдельных ее элементов приведено в ряде работ авторов с коллегами.

Наконец, в третьем имитационно-оптимизирующем контуре реализуются функции базовой (стратегической) поддержки АСУ ТП. В этом контуре уже на стадии проектирования АСУ ТП проводятся предпроектные исследования системы (в режиме стратегического управления): отрабатываются модели реального времени для второго уровня ТАСУ ТП в виде оптимальных траекторий, рассчитываются размеры резервных (буферных) зон для учета динамики при переменном темпе, определяются места установки датчиков и вно-

ся при необходимости корректировки в их показания, разрабатываются системы диагностики и экспертные системы.

В процессе эксплуатации (в режиме тактического управления) имитационно-оптимизирующий контур используется для текущей идентификации параметров модели реального времени и экспертных систем, для уточнения оптимальных траекторий и динамики управления.

На основе имитационно-оптимизирующего контура обеспечивается и представление о сложных саморегулируемых объектах и систем, в основе которых заложены явления синергетики (см. п. 18.2.3).

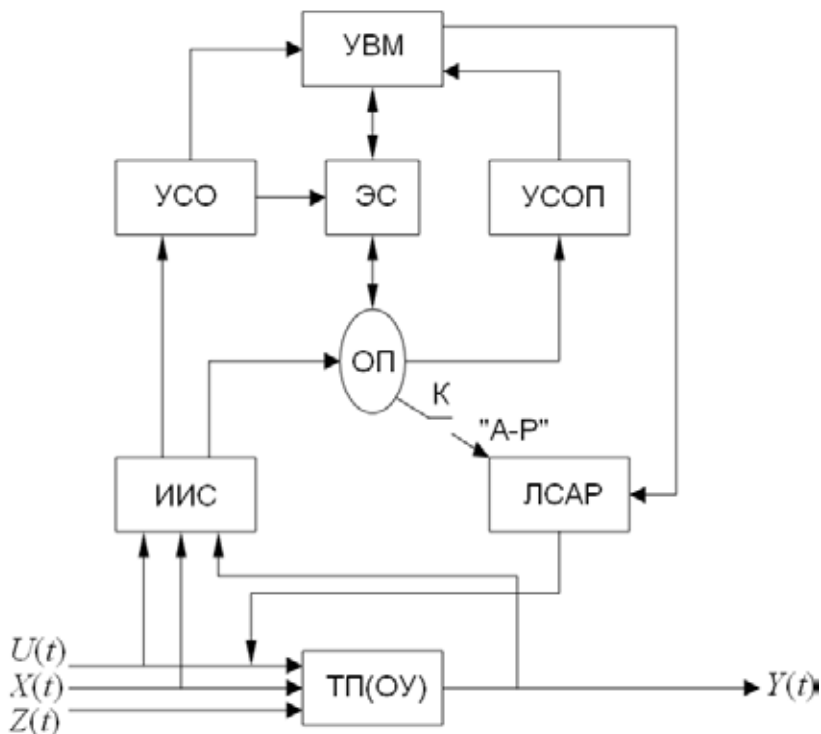


Рис. 18.2. Структурная схема АСУ ТП-Ф:

УВМ – управляющая вычислительная машина; ЭС – экспертная система;
УСОП – устройство связи с оператором; К – ключ (переключатель),
«А-Р» – «автомат – ручное» (управление); ЛСАР – локальная система автоматиче-
ского регулирования; УСО – устройство связи с объектом управления;
ИИС – информационно-измерительная система; ОУ – объект управления или
технологический процесс ТП; $U(t)$ – управляющее воздействие; $X(t)$ – контроли-
руемое возмущающее воздействие; $Z(t)$ – неконтролируемое возмущающее воз-
действие; $Y(t)$ – вектор выходных величин (параметров) объекта

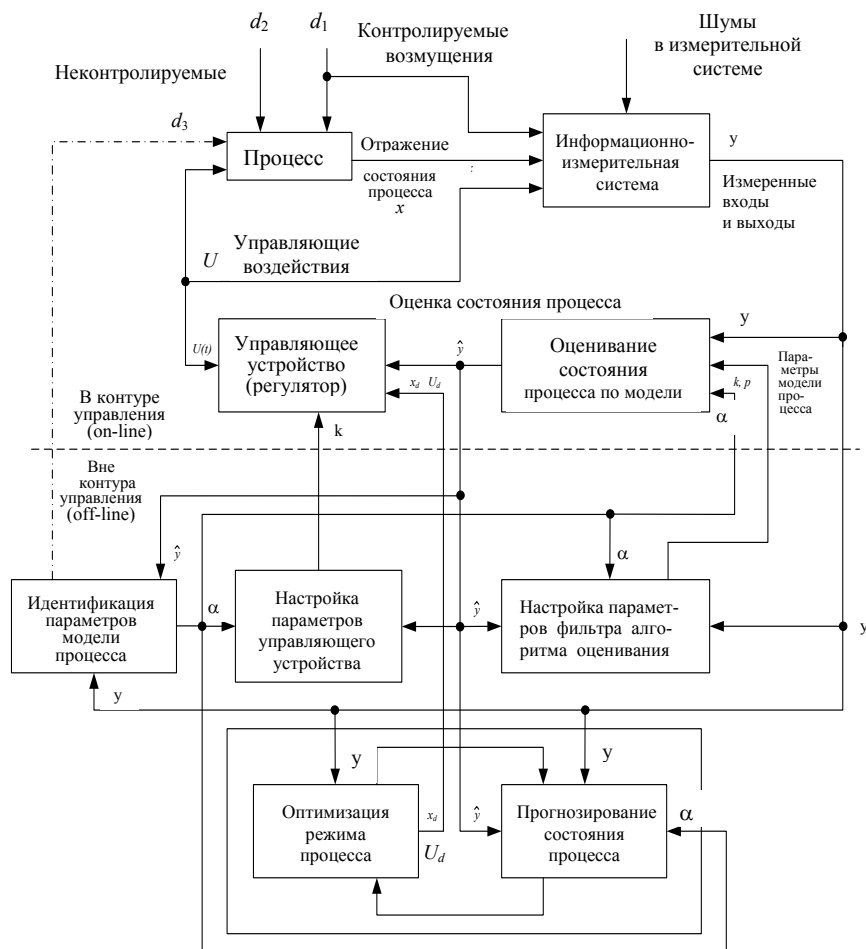


Рис. 18.3. Функциональная схема АСУ ТП:

d_1 – вектор контролируемых возмущений (технологический регламент: производительность, требования к конечной продукции, характеристики сырья, технологические ограничения); U – вектор управляющих воздействий;

d_2 – вектор неконтролируемых возмущений (трудно организовать всеобъемлющий контроль входных величин объекта); d_3 – вектор активных вспомогательных идентифицирующих воздействий (используется при активной идентификации для коррекции математической модели (ММ) объекта).

y – вектор выходных величин наблюдения за процессом (показания датчиков);

\hat{y} – вектор фактического состояния процесса;

α – параметры модели процесса

По мнению авторов, именно на основе экспертных систем возможно реализовать управление сложнейшими многопараметрическими объектами.

Интересно, что триадность построения ТАСУ ТП распространяется и на средства реализации системы (алгоритмические и технические) (см. рис. 18.1).

Так, нижний уровень предусматривает, как правило, применение линейных динамических моделей как средства анализа и синтеза САУ, а также регулирующих аналоговых и цифровых устройств с настроенными параметрами и уставками. Во втором контуре работают упрощенные модели реального времени и применяются УВМ. Наконец, в верхнем, поддерживающем контуре используются по возможности полные модели технологических процессов, могут применяться (в зависимости от класса задач управления) суперЭВМ и ПЭВМ.

Применение поддерживающего имитационно-оптимизирующего контура вносит существенные изменения в представления об идентификации моделей реального времени, являющихся важнейшей основой функционирования АСУ ТП. При этом функции обычно рекомендуемой натурной идентификации в значительной степени заменяются на вычислительную идентификацию, проводимую с использованием полной имитационной модели. Отметим, что на производственных объектах с распределенными параметрами проведение натурной идентификации является весьма сложной, дорогостоящей и поэтому почти не реализуемой процедурой. Вычислительный эксперимент обеспечивает реальный подход к вычислительной идентификации моделей реального времени, причем осуществлять это можно уже на стадии проектирования, когда реально существующий объект еще отсутствует.

Характер реализации такой вычислительной идентификации представлен на рис. 18.4, где также определены и основные функции моделей полного и реального времени. Как видим, полные модели используются для вычислительной идентификации моделей реального времени второго уровня АСУ ТП. Возникает вполне естественный вопрос о топологии и структуре так называемой полной модели технологических процессов в рамках АСУ ТП-Ф. Основными требованиями, предъявляемыми к этой модели, являются достаточно представительное отражение основных сторон технологического процесса и возможность оценки его наиболее существенных

параметров состояния с достаточной для управления и идентификации точностью при минимальном уровне работ по натурной адаптации полной модели и ее параметрической идентификации.

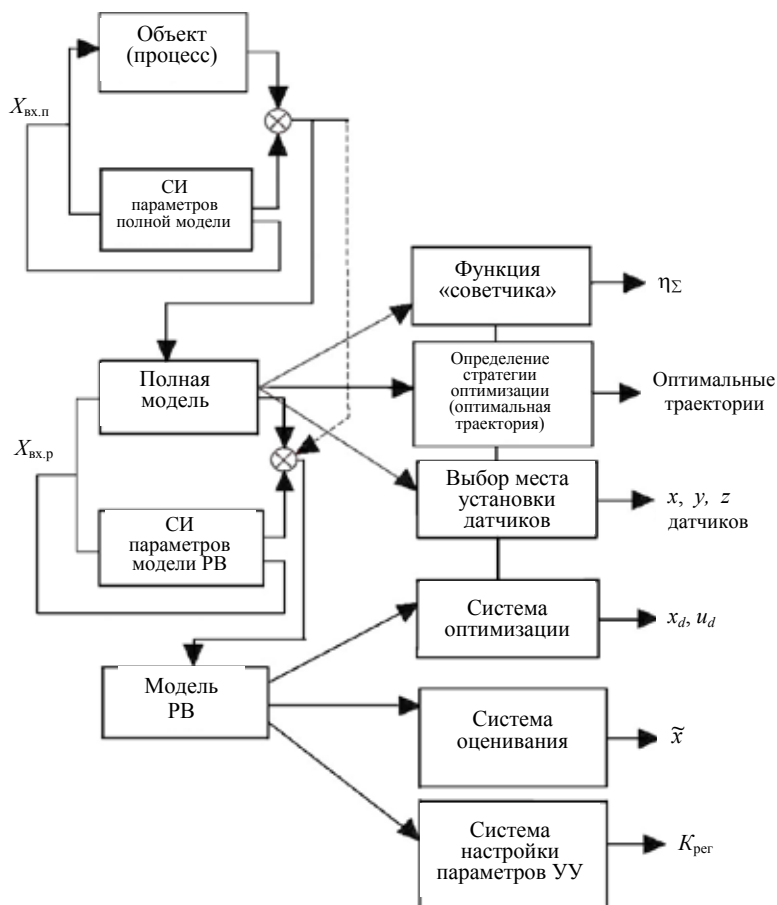


Рис. 18.4. Структура комбинированной натурно-вычислительной идентификации и основные функции моделей:

РВ – реальное время; СИ – система идентификации; УУ – управляющее устройство; $X_{вх.п}$ – входная величина для идентификации параметров полной модели; $X_{вх.р}$ – то же, но реальной модели; η_{Σ} – рекомендуемые значения критерия оптимальности (эффективности); x, y, z – координаты объекта при установке датчиков; x_d и u_d – уставки соответственно заданной выходной величины объекта и величины управления; \tilde{x} – параметр объекта, полученный в результате работы системы оценивания; $K_{пер}$ – настройки регулятора

Применительно к объектам с распределенными параметрами приемлемой для целей автоматизации основой детерминированной методологии построения полных моделей может являться обобщенный термодинамический подход. На примере объектов с сосредоточенными параметрами этот подход получил развитие в работах под руководством Б.Н. Петрова [18.49] и в настоящее время является достаточно признанной детерминированной основой построения математических моделей объектов управления на стадии формирования топологии и структуры математических моделей таких объектов.

Для объектов с распределенными параметрами развитие обобщенного детерминированного подхода к построению полных математических моделей также является необходимым, и предложения по развитию этого подхода были впервые представлены в работах автора [18.35; 18.53] и далее закреплены в целом ряде работ [18.20; 18.36; 18.39; 18.45; 18.48].

Применяемые математические методы как раз и составляют основу имитационно-оптимизирующего контура в ТАСУ (см. рис. 18.1).

Развитие и применение трехуровневых АСУ ТП (ТАСУ ТП) позволяет вывести на новый уровень функционирование систем управления и, по существу, является важнейшим этапом перехода к системам управления, включающим экспертные системы и системы искусственного интеллекта.

При этом следует учитывать всё возрастающие возможности как построения математических моделей сложных объектов, так и реализации их численного решения на непрерывно совершенствующихся суперкомпьютерах.

18.2.2. Обобщенный термодинамический подход при моделировании объектов с распределенными параметрами

Как отмечалось [18.1], авторам удалось распространить обобщенный термодинамический подход, предложенный, как известно, Б.Н. Петровым с соавторами [18.49], на объекты с распределенными параметрами. Напомним, что основой термодинамического подхода к построению математических моделей объектов является использование в обобщенной форме формулировки и математические выражения первого и второго закона термодинамики для описания объектов самой различной физической, химической, физико-хи-

мической и т. д. природы. При этом использовался в полной мере метод аналогии в интерпретации автора. Вопросы построения моделей объектов с распределенными параметрами рассмотрены в целом ряде авторских работ [18.1; 18.15; 18.20–18.25; 18.32; 18.36].

При этом исходили из того положения, что исключительно стохастические подходы к построению полных математических моделей объектов с распределенными параметрами являются в значительной степени еще менее реалистичными, чем такие же подходы для объектов с сосредоточенными параметрами вследствие значительно большей сложности объектов с распределенными параметрами.

Поэтому на стадии создания топологии и структуры математической модели было необходимо применение детерминированного подхода с последующими процедурами параметрической идентификации (адаптация модели) на базе натурных экспериментов. При этом требования к математической модели должны быть такими, чтобы свести к минимуму потребности в параметрической идентификации (в идеале свести их к нулю) вследствие отсутствия натуры на стадии проектирования и сложности проведения натурных экспериментов и идентификации.

Особенностью объектов с распределенными параметрами является, как известно, введение в рассмотрение внутренних координат системы, рассмотрение полей параметров состояния, что с математической точки зрения приводит к рассмотрению уравнений в частных производных, субстанциональных производных, дивергенций и т. д. Для таких объектов техно-логический процесс в наиболее обобщенном виде может быть представлен в виде так называемой обменной (переносной) модели, включающей обрабатываемую и обрабатывающую среды с обобщенными потоками W_1 и W_2 и поверхностью взаимодействия F , для которых задаются условия сопряжения и условия на внешних границах (рис. 18.5).

Исходя из основных принципов обобщенного термодинамического подхода, вводя представление о динамическом члене и субстанциональной производной для объектов с распределенными параметрами и основываясь на примере переноса энергии в движущейся вещественной среде, обобщенное уравнение теплового баланса и переноса для обрабатываемой и обрабатывающей

среды, по предложению автора, можно представить в следующем виде [18.1]:

$$\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = q_v + \operatorname{div}(\Gamma, \operatorname{grad} \varphi) - \rho \operatorname{div}(w \varphi) + \operatorname{div} q_{\text{л}} +$$

$$+ L_v + \frac{dp}{dt} + \rho p \frac{du}{dt} - \rho \frac{d \frac{w^2}{2}}{dt}, \quad (18.1)$$

где φ – параметр состояния; ρ – плотность; q_v – источниковый член; w – скорость; $q_{\text{л}}$ – вектор электромагнитного излучения; L_v – работа, совершаемая внешними силами; p – давление; u – удельный объем.

Представленное уравнение охватывает очень широкий спектр объектов (тепловых, скоростных, в турбулентных режимах и т. д.), включая и сверхзвуковые течения (в рамках так называемой «радиационной динамики»).

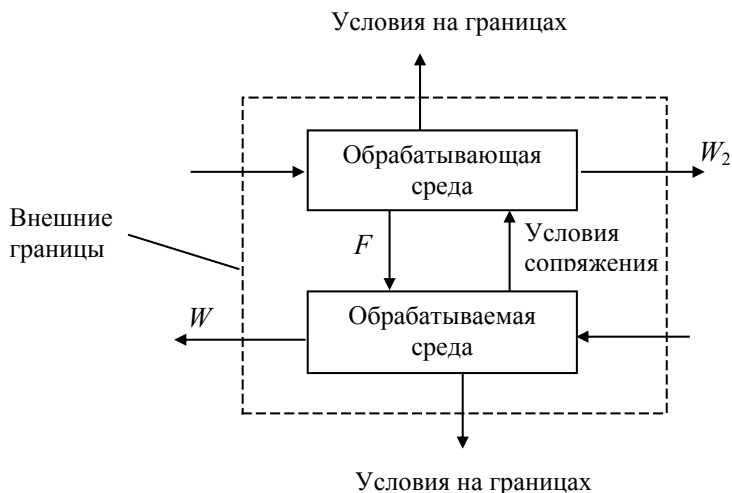


Рис. 18.5. Характерная структура обменной (переносной) модели объекта с распределенными параметрами

Как видим, в этом уравнении левая часть представлена динамическим членом, в правой части соответственно имеются источниковый, градиентный, конвективный и радиационный члены, а также

члены, представляющие работу внешних сил, изменение давления, удельного объема и кинетической энергии потока.

Система уравнений (18.1) для обрабатываемой и обрабатываемой сред дополняется условиями сопряжения, граничными и нулевыми условиями.

Представительность данного уравнения как обобщенного для различного вида переноса веществ или энергии может быть продемонстрирована на примере градиентного члена - в приложении к различным видам градиентного переноса (см. табл. 18.1).

Наиболее часто применяемые приемы аппроксимации системы (18.1) для технологических объектов заключаются в следующем.

В различных видах технологических процессов могут присутствовать или отсутствовать радиационный член, работа внешних сил, при сравнительно низких скоростях можно пренебречь членом, связанным с изменением кинетической энергии, с изменением давления и объема и т. д.

Таблица 18.1

Пример использования обобщенного уравнения
для различных видов градиентного переноса

Перенос	Величины φ	Закон градиентного переноса	Значение Γ
Энергии	Энтальпия i (температура T)	Фурье	Коэффициент теплопроводности
Количества движения	Скорость w	Навье-Стокса	Динамическая вязкость
Вещества компонента	Масса i -го компонента m_i	Фика	Коэффициент диффузии
Энергии турбулентности	Степень турбулентности K_T	Фика	Коэффициент диффузии вихрей

В случае упрощенных одномерных (вдоль оси X) линейных противоточных моделей система уравнений (18.1) с условиями сопряжения часто сводится к виду

$$\frac{d\varphi_2}{\partial t} = -\frac{K_{\Sigma} y w_{1x}}{W_2} (\varphi_2 - \varphi_1)$$

где K_{Σ} – суммарный коэффициент обмена; y – поперечная координата; w_{1x} – скорость обрабатываемой среды вдоль продольной координаты.

Например, для случая теплообмена W_2 – теплоемкость потока; φ – температура; K_Σ – коэффициент теплообмена. Индекс 1 относится к обрабатываемой среде, индекс 2 – к обрабатывающей среде.

Для случая физико-химического обмена W_2 – поток массы; φ_2 и φ_1 – текущая и равновесная концентрации реагентов; K_Σ – коэффициент массообмена.

В случае перехода от объектов с распределенными параметрами к объекту с сосредоточенными параметрами уравнение (18.1) приводится к известному виду

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{K\varphi_B}{T} = -\frac{1}{T}\varphi,$$

где K – коэффициент передачи; $T = RC$ – постоянная времени; R и C – обобщенные сопротивления и емкость объекта; φ_B – входной параметр объекта.

Более подробные материалы об обобщенном уравнении для объектов с распределенными параметрами и его использовании приведены в [18.1; 18.20], а также будут использоваться при последующем изложении.

18.2.3. Неравновесность и самоорганизация (в рамках синергетики) – проблемы управления в сложных объектах

Как отмечалось, синергетические подходы к представлению о сложных неравновесных объектах все более заметно используются и применительно к процессам управления, находя свое место и в рамках развиваемых в работах авторов структурах ТАСУ.

В рамках синергетического подхода неизбежно происходит расширенное представление о свойствах объектов в равновесной и неравновесной областях их функционирования, а также о возможных принципах управления объектами после прохождения так называемой точки бифуркации (переход к неравновесному состоянию, последовательность фазовых переходов и т. д.).

В этом плане, наверное, приходится вновь обращаться к термодинамическим подходам неравновесных состояний, развитым в работах И. Пригожина [18.50; 18.57]. К обобщенным термодинамическим подходам к моделированию объектов управления, развитым в

работах Б.Н. Петрова [18.49], и в наших работах – применительно к объектам с распределенными параметрами [18.32; 18.45]. Однако вполне понятно, что число объектов, связанных с представлениями о самоорганизации и критических бифуркационных точках весьма разнообразно и, конечно, далеко выходит за пределы во многом исходных термодинамических представлений.

В общих представлениях синергетика определяет роль хаоса в развитии динамических структур. Герман Хакен впервые ввел слово «синергетика» (дословно: теория совместного действия) [18.52; 18.53]. Он вкладывал в это понятие два положения: 1) теория возникновения новых качеств у сложных систем, которыми не обладает ни одна часть; 2) междисциплинарный подход.

В критическом состоянии определяемую роль играет не порядок, а хаос, именно он определяет качественные изменения, переход к существенно новому состоянию. В точках бифуркации хаос обеспечивает возможность схода с новой траектории при потере устойчивости в зоне кризиса, а затем помогает присоединиться к новому аттрактору.

В рамках ТАУ (теория автоматического управления) и кибернетики в целом рассматриваются в основном детерминированные объекты с сосредоточенными параметрами. Основные методы управления при этом – отрицательные обратные связи (управление по отклонению) или (и) системы с компенсацией по возмущению (управление по программе). Основные сложности при управлении – нелинейность объектов управления, что требует использования адаптивных регуляторов.

В рамках СТАУ (современной теории автоматизированного управления) уже рассматриваются и детерминированные объекты с распределенными параметрами, и в состав системы управления входят функциональные подсистемы оптимизации, оценивания, идентификации и локального автоматического управления – ЛСАР (см. рис. 18.3) [18.10].

Однако возникновение идей синергетики (в рамках так называемой IV научной революции) привело в теории автоматического управления к возможности рассмотрения несколько необычных с позиций классической ТАУ объектов управления, которые в отличие от четко детерминированных объектов могут быть, конечно, очень условно отнесены к разряду «неопознанных» объектов

управления. «Неопознанных», с одной стороны, в том плане, что далеко не всегда при их описании возможны детерминированные подходы, т. е. описание строгими математическими моделями, которые могут быть использованы при управлении. Этому могут быть две причины (Сцилла и Харибда, по выражению А.А. Самарского) – чрезмерная сложность объекта и ограниченные возможности ЭВМ. С другой стороны своеобразная «неопознанность» возникает вследствие проявления явления самоорганизации в процессах объектов управления, при этом часто очень небольшие воздействия могут приводить к проявлению совершенно новых свойств объектов, в корне изменяющих требуемые принципы и методы управления. Наиболее типичными процессами, в которых может проявляться такого вида «неопознанность» это процессы гидроаэродинамики, тепломассообмена (включая электромагнитное излучение), кинетика химических реакций и др., которые являются основой механизма большинства технологий и траекторий транспортных сред.

Таким образом, синергетика изучает качественные изменения в открытых системах, когда обратная связь может быть и положительная (с уменьшением энтропии). При этом ход процессов определяется внутренними свойствами системы.

Как отмечалось, применительно к механизмам динамической самоорганизации значительный вклад вносит термодинамический подход, развитый в трудах И. Пригожина, Г. Хакена и др. Заслугой Нобелевского лауреата И. Пригожина является развитие теории неравновесной термодинамики. Формулировка теоремы о минимуме производства энтропии привела к пониманию поведения систем далеких от равновесия и возможности описания этого поведения, исходя из представлений о динамической самоорганизации.

В работах этой научной школы создана довольно стройная теория, позволяющая определить условия, при которых возможна самоорганизация, в частности рассчитать степень отклонения от термодинамического равновесия и условия устойчивости неравновесных стационарных состояний, названных И. Пригожиным диссипативными структурами, т. е. структурами, связанными с рассеиванием энергии (с потерями).

В современном мире синергетика, как носитель новой парадигмы в науке, решительно преодолевает междисциплинарный статус

и новая методология внедряется в технику, искусство, информатику, экономику, психологию и т. д.

В рамках теории неравновесной термодинамики большое значение имеют вопросы, связанные с энтропией систем и производством энтропии.

В работах научной школы автора при подходах к управлению сложными объектами приходится постоянно сталкиваться с проблемами, возникающими в связи с переходом свойств объекта через критическую точку бифуркации.

По нашим наблюдениям, такие переходы часто связаны со стремлением увеличить производительность в системе (в широком смысле слова), а также с различными фазовыми переходами.

Характерные примеры в этом плане: увеличение производительности в машинах непрерывного литья заготовок, переход от ламинарного к турбулентному режиму в потоках жидкости и газа, высокопроизводительные процессы плавления, форсированные процессы горения, скоростной нагрев металла, в авиации и космонавтике переходы в сверхзвуковой режим, достижение первой и второй космических скоростей и т. д. Особенно важно в технике при этом рассмотрение возможных критических точек перехода к аварийным режимам и разработка управляющих воздействий по предотвращению этих режимов.

В связи со сложностью использования «классических» методов управления в такого рода объектах в настоящее время отрабатываются подходы и соответствующие рекомендации, в частности, это рекомендации московской, таганрогской, сибирской и уральской научных школ.

Применительно к технологическим процессам наиболее приемлемыми представляются синергетические подходы управления, развиваемые сибирской научной школой (г. Новокузнецк, Новокузнецкий металлургический университет) и, в частности, в работах В.П. Цымбала с авторами [18.54; 18.55]. В рамках уральской школы эти подходы дополнены в плане управления процессами развитием экспертных систем для сложных многопараметрических объектов.

В работах авторов (уральская школа) применительно к сложным высокопроизводительным, с трудом поддающимся детерминиро-

ванному моделированию объектам предложено и используется два подхода к процессам управления:

1. В более простых случаях – адаптивное управление с требуемой перенастройкой регуляторов. В частности, автором предложен новый так называемый детерминированный адаптивный метод управления [18.1; 18.33; 18.56].

2. В сложных случаях – применение логических, логико-количественных и количественно детерминированных экспертных систем с дискретным потактовым управлением. Описание этих систем и их использование приведены, в частности, в п. 18.5.

Имеющиеся в этом плане наши разработки связаны с использованием экспертных систем в металлургии, управлением струйно-факельным нагревом металла, разработкой скоростных методов плавления при получении металла с нанокристаллической упрочняющей структурой для ТВЭЛ'ов атомных реакторов, применением методов акустического воздействия и использование акустических методов определения температуры высокотемпературных объектов, разработки методов предотвращения аварийных состояний на металлургических объектах. Эти разработки проводятся с участием целого ряда предприятий, Национального исследовательского технологического университета – МИСиС, Института проблем управления, НИИ металлургической теплотехники – ВНИИМТ и др., отмеченными в п. 18.1.

По мнению авторов, теоретические и практические вопросы управления сложными высокопроизводительными, с явлениями самоорганизации объектами находятся в стадии становления, и накопление определенного опыта в этом плане является весьма актуальной задачей.

В современном мире синергетика, как носитель новой парадигмы в науке, решительно преодолевает междисциплинарный статус и новая методология внедряется в технику, искусство, информатику, экономику, психологию и т. д.

В рамках теории неравновесной термодинамики большое значение имеют вопросы, связанные с энтропией систем и производством энтропии.

При этом отметим введение понятия энтропии (исходя из рассмотрения цикла Карно) Клаузиусом и установление принципа максимума энтропии (Клаузиус, Томсон, Нерст) в изолированных равновесных системах

$$S = \frac{\Delta Q}{T}; \quad dS \geq 0. \quad (18.2)$$

В работах Л. Больцмана (1872 г.) было сформулировано понятие энтропии как логарифм вероятности состояния

$$S = k \log W, \quad (18.3)$$

где W – статическая величина – вероятность состояния, числа способов, которым может осуществиться это состояние; k – постоянная Больцмана (введена М. Планком).

В изолированных системах соблюдается, таким образом, второй закон термодинамики в его классической постановке

$$dS \geq 0. \quad (18.4)$$

Движущей силой равновесных процессов является стремление к минимуму свободной энергии и максимуму энтропии, т. е. наибольшей степени в состоянии равновесия $S = S_{\max}$.

Признаки систем, в которых возможна самоорганизация:

1. Система должна быть открытой, не изолированной, т. е. обмениваться веществом или энергией.
2. Система должна обладать определенным порядком сложности и способности к взаимодействию большого числа элементов.

И. Пригожиным предложен расширенный вариант второго закона термодинамики, применимый как к замкнутым, так и открытым системам. Энтропия при этом представлена следующим образом [18.50; 18.51]:

$$dS = d_i S + d_e S, \quad (18.5)$$

где $d_i S$ – производство энтропии внутри системы;

$d_e S$ – поток энтропии за счет обмена веществом или энергией.

Для изолированной системы $d_e S$ и $dS = d_i S \geq 0$, т. е. имеем второй закон термодинамики в его классической постановке.

Для неравновесной термодинамики в процессе эволюции система достигает состояния с более низкой энтропией

$$dS = \int_{\text{по пути}} dS < 0, \quad (18.6)$$

при этом $d_t S = 0$, а $d_e S = -d_e S < 0$.

Если в систему поступает достаточно большой отрицательный поток энтропии, то в ней может поддерживаться некоторая упорядоченная конфигурация, т. е. при определенных условиях возможен переход системы на новое структурное состояние.

Это условие может рассматриваться как необходимое, но недостаточное, так как срабатывание конкретного механизма наступления фазы самоорганизации в конкретных условиях является очень сложной проблемой.

И это основной признак «неопознанности» объекта в сложных условиях неравновесности процессов. В случае самоорганизации имеется влияние воздействия в виде потока вещества или энергии, поступающей из внешней среды. Структурное же упорядочение системы происходит спонтанно (самопроизвольно). Причем, как правило, невозможно детерминировано указать момент этого перехода.

Отсюда следует основное различие подходов кибернетики и синергетики. Если в кибернетике основное внимание уделяется роли рулевого (регулятора), жесткому воздействию на объект – жестким траекториям процессов, то в синергетике основная идея заключается в выборе таких воздействий на систему, которые бы согласовывались с внутренними изменяющимися (часто спонтанно в результате самоорганизации) свойствами объекта.

В теории линейных систем, не сильно отклоненных от термодинамического равновесия, возможны асимптотические устойчивости стационарных состояний и возбужденная система самопроизвольно стремится к стационарному состоянию, которому и соответствует минимум производства энтропии. В ТАУ такое явление называется саморегулированием и соотносится с устойчивостью по Ляпунову.

В нелинейной термодинамике (динамике в общем смысле) в процессах, в которых происходит систематическое отклонение от равновесия за счет увеличения некоторых параметров состояния или внешних воздействий, возможен переход к состоянию неустойчивости, при этом даже достаточно малое возмущение уводит систему от термодинамической ветви и возможна так называемая бифуркация, в которой возникает новая ветвь решений и состояний процесса. Это самоорганизованный характер процессов в сложных системах, к которым, кроме чисто термодинамических систем, относится

множество макрообъектов: общество, биосфера, системы вооружений, многие технологии и др. иерархические структуры и разработки теории самоорганизованной критичности очень важно для анализа и выработки соответствующих управляющих воздействий, адекватных таким системам. Условия самоорганизации и проблемы управления в этих условиях применительно к металлургическим процессам детально рассмотрены в работах сибирской школы под руководством В.П. Цымбала [18.54; 18.55]. Вопросы, связанные с так называемой прикладной теорией автоматического управления развиваются в работах таганрогской школы под руководством А.А. Колесникова [18.57; 18.58].

Применительно к ряду систем проблемы синергетики, включая сложные социально-технологические системы, развиты в работах Г.Г. Малинецкого и С.П. Курдюмова [18.48].

Рассмотрим ряд вопросов, связанных с управлением при самоорганизации, непосредственно или косвенно касающихся деятельности автора.

Эти проблемы отражены в предыдущих и настоящих материалах данного издания [18.1–18.4], а также во многих ранее цитируемых работах.

При этом, с точки зрения автора, в ряде технических приложений проблема перехода в критической точке бифуркации к новым часто непредсказуемым динамическим характеристикам объекта связана в основном со стремлением к увеличению именно производительности (в широком смысле слова) в той или иной области техники или технологий [18.33].

1. Жидкостные емкости и управление уровнем.

В случае свободного стока имеем статический объект с самовыравниванием, выбор регулятора прост и обеспечивается хорошая устойчивость. Производительность процесса при этом определяется стоком (разливка в изложницы, разливка в промежуточный ковш МНЛЗ). Передаточная функция уравнения

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} \quad (18.7)$$

Стремление к увеличению производительности приводит к необходимости принудительного стока – возникает точка бифуркации – в результате получаем объект без самовыравнивания (астатиче-

ский), в этом случае весьма трудно управлять уровнем и подбирать требуемые настройки регулятора.

Передаточная функция объекта в корне изменяется

$$W(p) = \frac{1}{T_u p}. \quad (18.8)$$

Здесь K – коэффициент передачи (усиления), T и T_u – постоянные времени объектов с самовыравниванием и без самовыравнивания, соответственно; p – оператор Лапласа.

Приведем аналогичные примеры объектов с самовыравниванием и без самовыравнивания.

При нормальном горении имеет место сток теплоты. При увеличении производительности горелки возможен срыв пламени. В изолированной системе при этом возможен взрыв.

В работах в плане совершенствования управления процессами горения и теплопередачи была разработана и использована система импульсного отопления (печь XXI века) [18.3].

Атомный реактор – замедление реакции, с использованием стержней, отъема тепла охлаждением ТВЭЛов.

Потеря охлаждения, цепная реакция – расплавление, взрывы. Примеры бифуркаций: Чернобыльская авария – самопроизвольная цепная реакция.

2. Измерение расхода жидкости или газа. Популярным датчиком при этом является измерительная диафрагма. В потоке возможен ламинарный и турбулентный режимы.

Ламинарный режим имеет место при числе подобия $Re < 2300$.

Переходный и турбулентный режимы – при числе подобия $Re > 2300$.

При этом резко изменяется характер движения (энтропия при этом уменьшается, на порядок увеличивается турбулентная вязкость).

В этом случае статическая характеристика при измерении расхода определяется числом подобия Re . Неопознанность объекта проявляется в отсутствии строгой теории турбулентности, развита лишь полуэмпирическая теория турбулентности, статическая характеристика при измерении расхода определяется для конкретных условий из эксперимента.

3. Процессы в плавильных ваннах.

3.1. Имеет место самопроизвольное ускорение обезуглероживания, так называемое, самораскипание ванны – резкое увеличение

скорости обезуглероживания. Возможно при увеличении содержания FeO в шлаке вспенивание шлака с выбросами (увеличение вязкости и поверхностного натяжения шлака), это может привести к очень тяжелым авариям.

Непрерывное регулирование в этих процессах часто сложно реализовать. Применяется дискретное управление, разрабатываются экспертные системы, советчика мастера.

Стремление к увеличению производительности – привело к переходу от мартеновского производства к конвертерному и электродуговому (ЭДП) – при этом обеспечивается сложное дискретное поагрегатное управление за счет увеличения капзатрат: добавляются печи – ковши и вакууматоры.

Вследствие скоротечности конвертерной и электродуговой плавки, протеканию спонтанных самоорганизующихся процессов, самораскипание ванны, вспенивание шлака – возможны лишь дискретные управляющие воздействия и дискретный контроль основных технологических параметров – температуры ванны и содержания углерода в металле. Температура в настоящее время, как правило, измеряется дискретно погружными термопарами, при этом не учитывается неоднородность температур по глубине и ширине ванны, а локальные значения температур не всегда обеспечивают достоверность сведений о температурном состоянии ванны.

Совместно с Мариупольским технологическим институтом и Израильской фирмой Accustal был разработан непрерывный акустический способ определения интегральной температуры конвертера и ЭДП. Метод испытан на заводе «Азовсталь» и внедрен на одном из заводов Бразилии.

Он включает волновод, микрофон и программное обеспечение, позволяющее выделять из спектра шума при проведении плавки базовую расчетную частоту, используемую в итоговом алгоритме расчета температуры. При испытании метода показана возможность сократить время плавки и до 18 % снизился расход электроэнергии в ЭДП (см. п. 18.6.3).

3.2. Медная плавка – переход от отражательной плавки к печи Ванюкова (ПЖВ), при этом достигается резкое увеличение производительности. Это приводит к значительному усложнению управлением, могут возникать аварийные состояния и требуется их предотвращения. Работа под руководством В. Г. Лисиенко проведена на СУМЗ'е, где аварийное состояние возникает на ПЖВ при отключении кислорода.

Требовалось методами математического моделирования оценить возможность предотвратить замерзание ванны и образование настывов на охлаждающих кессонах на период аварийного отключения подачи кислорода. В результате проведения работы были рекомендованы конструктивные и режимные параметры по недопущению замерзания ванны путем дополнительного газового нагрева ванны. Эти рекомендации подтверждены в результате их использования в реальной обстановке аварийной ванны [18.3; 18.4].

Проведена работа по оценке состояния процесса и требуемых управляющих воздействий при различных возмущающих воздействиях (смена шихтовых материалов, степень обогащения кислорода и т. д.), т. е. ведется подготовка к созданию экспертной системы управления плавкой.

4. Увеличение производительности в разработанных с участием и под руководством авторов печах струйно-факельного нагрева, при этом изменяются требования по управлению, требуется непосредственное измерение температуры металла, а не печи, требуется сложное управление при остановках и пусках [18.3; 18.4].

5. В котельных агрегатах имеет место фазовое превращение, при этом выделяются отдельные блоки управления – экономайзер и пароперегреватель.

6. Нанотехнологии – резкое изменение свойств среды при уменьшении размеров частиц. Используется в работах автора с коллегами при разработке технологии получения безуглеродистого железа в многофункциональном плавильном агрегате с вращением металла и шлака при соответствующем легировании сплавов с нанопропроченной структурой металла для увеличения срока службы ТВЭЛ'ов в ядерных реакторах [18.3; 18.4].

7. Процессы алюмотермии и кремниотермии – восстановление элементов Al и Si – при этом имеет место резкое увеличение выделения теплоты вследствие сильно экзотермических химических реакций. Процессы используются при разработке агрегата МПА с вращением металла и шлака и новых технологий выплавки легированных сталей и сплавов. При этом применяются дискретные воздействия при подаче сильных восстановителей [18.3; 18.4].

8. Нестабильность газового потока в переходной области при переходе от струйного к пузырьковому режиму течения при продувке металла в ковше.

Процесс эрозии продувочной пробки в струйной области течения при продувке металла в ковше и управление измельчением пузырьков с использованием управляемой акустической пробки. При этом достигается увеличение стойкости продувочной пробки и одновременно качества металла [18.4].

9. Стремление к увеличению производительности определяется заменой мартеновских печей на ЭДП. Но требуются сложные процессы «доводки» металла (печи-ковши, вакууматоры).

10. Приложения также связаны с использованием дискретных экспертных логических и логико-количественных экспертных систем в сложных технологических системах, трудно поддающихся математическому описанию (доменные печи, непрерывные процессы получения фольги) (см. п. 18.5; 18.7.3).

11. Взаимодействие с Институтом проблем управления и Институтом космических исследований им. М.В. Келдыша.

Освоение космоса связано со своеобразным увеличением «производительности» – скоростей полета и точности заданной траектории полета.

Имеет место применение экспертных систем в корректировке транспорта.

Характерный пример бифуркации – вход космического аппарата в плотные слои атмосферы – при этом возникают задачи по управлению температурными режимами корпуса корабля [18.33].

Известны, конечно, примеры неудачных пусков при всей тщательности расчетов траекторий – причиной часто является сложность и «неопознанность» ситуации.

Например, катастрофа Ю.А. Гагарина связана с предположением, что возникло облако на пути самолета – и в точке бифуркации не удалось выровнять самолет. Однако можно отметить, что, например, причина катастрофы польского самолета с Президентом Польши на борту, возможно, тривиальна, выяснилось, что имела место неточность показаний (на 100 м и более) датчика высоты.

12. В общественной жизни точки бифуркации отмечают переходы от одного социального строя к другому, в частности, – плановая экономика и рынок. Роль мотивационных факторов при этом проявляется независимо от социального строя – проявление факторов самоповышения эффективности экономики с использованием мотивационных факторов трудовой деятельности, а не только управление с изданием законов и указов [18.1].

Рассмотрение процессов самоорганизации и переходных процессов в критических точках бифуркации применительно к техническим системам приводит к следующим выводам по управлению.

1. В ряде случаев возможна перенастройка регуляторов даже при использовании приемов кибернетики, т. е. отрицательной обратной связи – пример – непрерывная разливка, это удалось фирме Сименс даже на трубной заготовке малого диаметра. Эту же идеологию исповедует и Таганрогская школа.

2. По рекомендациям Сибирской школы к режимам самоорганизации возможно применение адаптивного дискретного управления с прогнозирующей управляющей моделью, например, по типу дуального управления Н.А. Фельдбаума.

Работы с прогнозирующей моделью – кольцевая печь ПНТЗ и завод «Хомутово» в Чехии, управление обжигом окатышей – Лебединский ГОК.

3. Использование дозированных тактовых дискретных воздействий на основе логических и логико-количественных экспертных систем – конкретные приложения относятся к доменному процессу, процессу непрерывного изготовления фольги и др.

При этом «неопознанность» объекта устраняется использованием экспертных оценок или на современном этапе уже возможность применения хотя и упрощенных математических моделей для отдельных подсистем управления (в работах авторов это касается процессов теплообмена).

Если удастся использовать математическую модель (работа применительно к доменному процессу), то эффективность прогноза значительно увеличивается (см. п. 18.5.7).

Развитие синергетических подходов применительно к управлению в технике постепенно приводит к созданию нового раздела в теории управления БТАУ – бифуркационной ТАУ, связанной с возникновением при определенных часто непредсказуемых условиях резких переходов в состоянии объектов и их самоорганизацией на уровне критических точек бифуркации – раздела бифуркационной критичной ТАУ. В этом плане в области термодинамики уже И. Пригожиным и его школой развиты достаточно четкие представления о неравновесности процессов и их особенностях.

18.3. Совершенствование систем управления магнитным обогащением железных руд и термообработки железорудных окатышей

18.3.1. Управление процессом магнитного обогащения железных руд

В работах под руководством Б.Б. Зобнина (Уральский государственный горный университет) с коллегами большое внимание уделяется проблемам автоматизации обогащения железных руд, в частности, эти работы связаны с тесным сотрудничеством Б.Б. Зобнина с Магнитогорским металлургическим комбинатом.

Приведем пример одной из характерных разработок в этой области, выполненных с участием автора в рамках содружества УГТУ, УрФУ и РУО АИН им. А.М. Прохорова [18.59].

Данная разработка отличается от известных тем, что в ней с целью повышения качества управления процессом обогащения железных руд используется адаптация регулировочных характеристик системы управления к изменениям свойств исходных материалов и параметров технологического процесса.

Таким образом, устройство для автоматического управления процессом магнитного обогащения железных руд содержит датчик расхода руды, анализаторы содержания готового класса и железа в концентрате и регулятор расхода руды и отличается тем, что сигналы с выходов анализаторов готового класса и железа в концентрате поступают на блок вычисления первых разностей. По результатам сравнения их логического произведения с заданным пороговым уровнем производится переключение весовых коэффициентов в блоке, производящем вычисление в скользящем окне взвешенных средних значений содержания готового класса и железа в концентрате. Затем производится селекция положительных и отрицательных выбросов содержания готового класса и железа в концентрате, расчет средних амплитуд сигналов и их частного пропорционального коэффициенту передачи по каналу: содержание готового класса – содержание железа в концентрате. С использованием полученного значения коэффициента передачи производится расчет прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате и требуемой производительности по руде.

На рис. 18.6 изображена блок-схема устройства автоматического управления процессом магнитного обогащения железных руд.

Устройство включает анализатор 1 обогатимости исходной руды, датчик 2 расхода руды, анализатор 3 готового класса в концентрате, анализатор 4 содержания железа в концентрате, блок 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате, переключатель 6 весовых коэффициентов, блок 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате, селектор 8 положительных и отрицательных выбросов, блок 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного, блок 10 расчета текущих значений параметров модели объекта, блок 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде, блок 12 расчета требуемой производительности по руде, регулятор 13 расхода руды, процесс 14 обогащения руды.

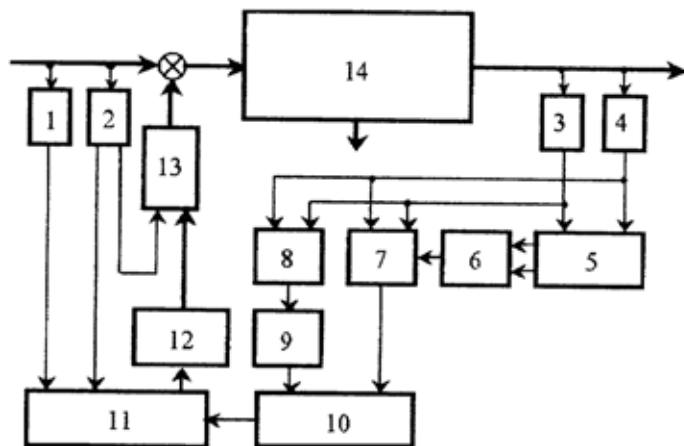


Рис. 18.6. Схема устройства автоматического управления процессом магнитного обогащения железных руд:

1 – анализатор обогатимости железной руды; 2 – датчик расхода руды; 3 – анализатор готового класса в концентрате; 4 – анализатор содержания железа в концентрате; 5 – блок расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате; 6 – переключатель весовых коэффициентов; 7 – блок расчета среднего значения содержания железа в концентрате и готового класса; 8 – селектор выбросов; 9 – блок расчета средних амплитуд и их частного; 10 – блок расчета текущих значений параметров объекта; 11 – блок расчета прогнозируемых значений железа в концентрате и содержания готового класса; 12 – блок расчета требуемой производительности; 13 – регулятор расхода руды; 14 – объект обогащения руды

К входам блока 10 расчета текущих значений параметров модели объекта подключены выход блока 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного и выход блока 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате. Выход блока 10 расчета текущих значений параметров модели объекта соединен с третьим входом блока 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде. Выход блока 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде соединен с входом блока 12 расчета требуемой производительности по руде, а его выход подключен ко второму (задающему) входу регулятора 13 расхода руды, который изменяет количество подаваемой руды в процесс 14 обогащения руды.

В качестве анализатора 1 обогатимости исходной руды и анализатора 4 содержания железа в концентрате используется прибор СРМ-13. В качестве анализатора 3 готового класса в концентрате – гранулометр, в качестве датчика 2 расхода руды – электронно-гидравлические весы.

В качестве блока 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате, переключателя 6 весовых коэффициентов, блока 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате, селектора 8 положительных и отрицательных выбросов, блока 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного, блока 10 расчета текущих значений параметров модели объекта, блока 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде, блока 12 расчета требуемой производительности по руде использован программируемый модуль в комплекте с РС IBM, в котором по специальным программам осуществляются операции суммирования, вычитания, умножения, деления, интегрирования и дальнейшей обработки величин, входящих в математическую постановку задачи.

В остальных узлах технологического процесса использовано стандартное промышленное оборудование: в качестве регулятора 13 расхода руды – регулятор – Р-17, в качестве процесса 14 обогащения руды – установленное технологическое оборудование обогатительной фабрики.

Расчет первых разностей в блоке 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате проводится по формуле:

$$\nabla Y_{ji} = Y_{ji} - Y_{j,i-1}, j = 1, 2, \quad (18.9)$$

где Y_{ji} , $Y_{j,i-1}$ – значения j -го показателя, измеренные в моменты времени i и $i-1$ соответственно;

$j = 1$ – содержание готового класса в концентрате;

$j = 2$ – содержание железа в концентрате.

Затем здесь же, в блоке 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате, вычисляется логическое произведение модулей первых разностей

$$S = (|\nabla Y_{11}| \cap |\nabla Y_{21}|) > \Delta \quad (18.10)$$

и проводится сравнение вычисленного значения S с заданным пороговым уровнем Δ , и если это значение превышает заданный пороговый уровень, то в переключателе 6 весовых коэффициентов производится переключение весовых коэффициентов в соответствии с формулой

$$V = \begin{cases} M_1, & \text{при } S > \Delta \\ M_2, & \text{при } S < \Delta, \end{cases} \quad (18.11)$$

где M_1 , M_2 – законы изменения весовых коэффициентов в переключателе 6 весовых коэффициентов.

В блоке 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате, выполняющем в скользящем окне расчет взвешенного среднего значения \bar{Y}_{cj} результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате, вычисления производятся по формуле:

$$\bar{Y}_{cj} = 1/r \cdot \sum_{i=r}^i q_{j,i-r} \cdot Y_{j,i-r}, \quad (18.12)$$

где r – ширина скользящего окна;

$q_{j,i-r}$ – весовые коэффициенты.

В селекторе 8 положительных и отрицательных выбросов производится селекция положительных и отрицательных выбросов содержания железа и готового класса в концентрате.

Автоматическое управление процессом магнитного обогащения железных руд реализовано следующим образом.

Выход анализатора 1 обогатимости исходной руды и выход датчика 2 расхода руды соединены с первым и вторым входами блока 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде.

Второй выход датчика 2 расхода руды соединен с первым входом регулятора 13 расхода руды. Выход анализатора 3 готового класса в концентрате и выход анализатора 4 содержания железа в концентрате соединены с первым и вторым входом блока 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате, первым и вторым входом блок 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате, а также – с первым и вторым входом селектора 8 положительных и отрицательных выбросов. Два выхода блока 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате подключены к входу переключателя 6 весовых коэффициентов, выход которого соединен с третьим входом блока 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате. Выход селектора 8 положительных и отрицательных выбросов соединен с входом блока 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного.

Для этого рассчитываются отклонения j -го показателя от его среднего значения, найденные на большом интервале времени, например, по $N_B = 100$ точкам, по формуле:

$$\bar{Y}_{jB} = 1/N_B \cdot \sum_{i=N_B}^i Y_{j,i-N} \quad (18.13)$$

Выделяются отрезки (выбросы), на которых знаки анализируемых показателей остаются неизменными. Для обеспечения требуемой точности расчетов длины отрезков должны составлять не менее 5 точек. Для этих отрезков рассчитываются средние значения \bar{Y}_{jB}

амплитуд анализируемых показателей по формуле (18.13) при N_B , равном ширине выброса.

Средние амплитуды положительных и отрицательных выбросов \bar{Y}_{ja} рассчитывается по формуле:

$$\bar{Y}_{ja} = \sum_i (Y_{j,i} - \bar{Y}_{jB}) / N_B. \quad (18.14)$$

В блоке 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного осуществляется расчет средних амплитуд положительных и отрицательных выбросов, а также определяются отношения этих амплитуд, равные коэффициентам передачи по каналам:

- производительность по руде – содержание готового класса в концентрате (b_1);
- содержание готового класса – содержание железа в концентрате (b_{21});
- обогатимость руды – содержание железа в концентрате (b_{22}).

В блоке 10 расчета текущих значений параметров модели объекта по вычисленным значениям взвешенных средних значений результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате и коэффициента передачи по каналу: содержание готового класса в концентрате – содержание железа в концентрате вычисляются текущие значения параметров модели объекта.

В блоке 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде производится расчет прогнозируемых значений содержания готового класса (Y_1) и железа в концентрате (Y_2) при известной обогатимости руды и производительности по руде по формулам:

$$Y_1 = b_{01} + b_1 \cdot Q, \quad (18.15)$$

$$Y_2 = b_{02} + b_{21} \cdot Y_1 + b_{22} \cdot V,$$

где Q – производительность по руде; V – обогатимость руды.

Аналогично в блоке 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде определяются

коэффициенты передачи по каналам: производительность по руде – содержание готового класса и показатель обогатимости – содержание готового класса.

Устройство работает следующим образом. Сигналы с анализатора 3 готового класса в концентрате и анализатора 4 содержания железа в концентрате поступают на входы блока 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате. Сигналы с выхода блока 5 расчета первых разностей содержания железа и готового класса в концентрате, пропорциональные первым разностям содержания готового класса и железа в концентрате, поступают в переключатель 6 весовых коэффициентов, в котором вычисляются модули первых разностей, их логическое произведение и выполняется сравнение полученного произведения с заданным пороговым уровнем. В зависимости от результатов сравнения производится переключение весовых коэффициентов в блоке 7 расчета взвешенного среднего значения в скользящем окне результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате. В селекторе 8 положительных и отрицательных выбросов производится селекция положительных и отрицательных выбросов содержания готового класса и железа в концентрате. Отселектированные сигналы поступают в блок 9 расчета средних амплитуд сигнала при положительных и отрицательных выбросах и их частного, где производится расчет средних амплитуд сигналов и их частного, пропорционального коэффициенту передачи по каналу: содержание готового класса в концентрате – содержание железа в концентрате. В блоке 10 расчета текущих значений параметров модели объекта по вычисленным значениям взвешенных средних значений результатов измерения содержания готового класса и железа в концентрате и коэффициента передачи по каналу: содержание готового класса в концентрате – содержание железа в концентрате вычисляются текущие значения параметров модели объекта. В блоке 11 расчета прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды и производительности по руде проводится расчет прогнозируемых значений содержания готового класса и железа в концентрате при известной обогатимости руды, измеренной анализатором 1 обогатимости исходной руды, и производительности по руде, измеренной датчиком 2 расхода руды.

В блоке 12 расчета требуемой производительности по руде производится расчет требуемой (максимально возможной при условии выполнения ограничений на содержание железа в концентрате) производительности по руде. Рассчитанное значение является заданием регулятору 13 расхода руды.

С выхода регулятора 13 расхода руды сформированный сигнал поступает на соответствующее технологическое оборудование, позволяющее изменять количество руды, поступающей в процесс 14 обогащения руды.

Таким образом, благодаря введенным блокам и связям, учитывается влияние неконтролируемых возмущающих воздействий на технологический процесс и обеспечивается гибкая адаптации регулировочных характеристик к изменениям свойств обогащаемой руды и параметров технологического процесса, что позволяет повысить качество управления: существенно снизить число случаев нарушения технических условий на содержание железа в концентрате и увеличить среднюю производительность по руде, что также обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии на тонну концентрата.

18.3.2. Системы управления производством железорудных окатышей

Данный параграф также посвящен совершенствованию систем управления термообработкой железорудных окатышей на обжиговых конвейерных машинах. Обжиговые конвейерные машины в термообработке окатышей занимает ведущее место как в нашей стране, так и за рубежом. Технологии производства, конструкции обжиговых машин посвящено большое количество изданий, в том числе и справочных изданий, подготовленных при авторстве и под редакцией В. Г. Лисиенко [18.15; 18.20; 18.22].

Значительное внимание уделено этим работам НПВП «ТО-РЭКС», НИИ металлургической теплотехники – ВНИИМТ, ОАО «Уралмаш», Механобчерметом, Национальным исследовательским технологическим университетом – МИСиС, УрФУ и др.

В рассматриваемом материале освещены в основном вопросы управления процессами, при этом выделены работы, проводимые при участии авторов и УрФУ в содружестве с НИИ металлур-

гической теплотехники — ВНИИМТ, НПВП «ТОРЭКС» на ряде горно-обогатительных комбинатов (Лебединский, Михайловский, Качканарский, Магнитогорский, Соколовско-Сарбайский, Эрдэнэт (Монголия) и др.). Значительная роль в проведении данных работ принадлежит А.П. и А.А. Буткаревым, Г.М. Майзелю и другим сотрудникам НПВП «ТОРЭКС», нашему аспиранту А.В. Стародумову (в настоящее время сотрудник НПВП «ТОРЭКС»), нашему докторанту В.Н. Круглову и др. В. Г. Лисиенко являлся научным руководителем и научным консультантом по кандидатской и докторской диссертациям А.А. Буткарева.

В качестве примера приведены результаты работ на Лебединском ГОКе и Соколовско-Сарбайском горно-обогатительном производственном объединении (г. Рудный, Казахстан), проводимых при активном участии А.П. и А.А. Буткаревых [18.32; 18.45; 18.60–18.69].

Техническая и функциональная структуры усовершенствованных АСУ ТП термообработки окатышей

Разработки данной АСУ ТП первоначально проводились применительно к конвейерной машине ОК-306 Лебединского ГОКа [18.32; 18.45; 18.60–18.63; 18.66]*. При этом важно было определиться не только с уровнями локальных САР, но и с разработкой верхнего уровня АСУ ТП, а в этом случае ставилась задача выбора и использования математических моделей для решения функциональных задач данного верхнего уровня (см. п. 18.2).

При этом учитывали, что применение математических моделей в составе АСУ ТП производства окатышей на конвейерных машинах позволяет решить ряд задач, реализация которых существенно облегчает работу обслуживающего персонала, ведущего технологический процесс, и повышает технико-экономические показатели агрегатов. Появляется возможность предоставлять оператору ин-

* Буткарев А.А. Разработка и применение математических моделей и алгоритм для исследования и оптимизации параметров непрерывного технологического процесса с плотным фильтруемым слоем на примере производства железорудных окатышей: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук / А.А. Буткарев. – Екатеринбург, 1998. – 24 с.

Буткарев А.А. Исследование и оптимизация технологических схем обжиговых конвейерных машин и режимов термообработки железорудных окатышей: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук / А.А. Буткарев. – Екатеринбург, 2012. – 46 с.

формацию, недоступную для непосредственного измерения, рассчитывать, с использованием модели в контуре обратной связи, управляющие воздействия для стабилизации отдельных технологических параметров, решить задачи оптимизации по выбранным критериям с соответствующими ограничениями, в том числе и на качество выпускаемого продукта. В случае оптимизации статического режима, математическая модель определяет задания локальным регуляторам, учитывающие конкретную технологическую ситуацию. Однако в случае использования математических моделей для решения этих задач необходимо уже на стадии проектирования учитывать особенности технологического процесса, возможности комплекса технических средств (КТС) и, в соответствии с этим, строить структуру автоматизированной системы управления, в рамках которой и будет реализована математическая модель.

Техническое обеспечение, включающее в себя полный набор технических средств и вычислительной техники, используемых в системе, определяет безотказность, долговечность и надежность работы всей системы. Поэтому к выбору технических средств необходимо было подходить очень тщательно.

С точки зрения надежной и безотказной работы, как известно, хорошо зарекомендовали себя технические средства, производимые фирмой Сименс (Германия).

По мере развития вычислительной техники и ее применения в АСУ ТП математическое обеспечение вместе с построенным на его основе программным приобретают все большее значение и становятся соизмеримым, а иногда и превышают по стоимости КТС системы.

Созданная на Лебединском ГОКе система управления обжиговой машиной ОК-306, как это отмечено в п. 18.2, являлась двухуровневой. Основной целью ее создания являлось повышение производительности обжиговой машины, оперативности управления, качества обожженных окатышей, снижение удельных энергозатрат, защита обжиговой машины.

Система управления при этом должна обеспечить выполнение следующих функций:

- сбор и первичную обработку технологической информации;
- контроль отклонения от регламентных пределов;
- формирование технологических сообщений;

- отображение информации;
- вычисление управляющего воздействия по каждому каналу управления и передают его на вход исполнительного механизма;
- формирование и передачу задания локальным регуляторам;
- проверку аварийных конфигурационных условий и сигнализация возникших аварий;
- автоматическое резервирование функций управления процессом;
- изменение, в случае необходимости, конфигурации, как отдельного контура, так и всей системы управления и др.

Локальный (базовый) уровень (см. п. 18.2) осуществляет непосредственное управление ходом технологического процесса, стабилизацию технологических параметров в режиме непосредственного цифрового управления. Верхний уровень осуществляет обработку, с использованием математических моделей информации, поступающей с датчиков обжиговой машины и оперативного персонала, и, в случае решения задач оптимального управления, формирует и передает задания (уставки) локальным регуляторам на корректировку режима термообработки в соответствии с выбранным критерием оптимизации.

Использование математических моделей на верхнем уровне системы управления предъявляет определенные требования и определяет задачи, решаемые на базовом уровне. В случае неправильного проектирования системы базового уровня, определения задач, решаемых на нем и способов их реализации, ожидаемый эффект от использования задач верхнего уровня не может быть получен. То есть, при реализации математических моделей на действующем промышленном агрегате необходимо, с одной стороны, учитывать особенности существующей системы управления, а с другой, – модернизировать ее с учетом особенностей решаемых задач с использованием математических моделей.

В задачи верхнего уровня должны входить отображения информации о ходе технологического процесса, информационный обмен с АСУ цеха производства окатышей, защита и диагностика системы управления и обжигового оборудования, а также управление технологическим процессом по математическим моделям. К последним относятся следующие задачи:

- косвенные измерения и прогноз параметров (температура слоя, обжиговой тележки, порозность слоя и др.);

- прогноз качества (прочности) окатышей;
- оптимизация технологического процесса по критериям минимизации удельного расхода топлива, электроэнергии и максимизация производительности агрегата (при соответствующих ограничениях).

Для реализации математических моделей на работающем агрегате была сформирована соответствующая информационная база. Она включает в себя более 120 аналоговых сигналов, поступающих с датчиков, а также данные, вводимые вручную с пульта оператора. Как показывает анализ, а также практика и опыт разработки систем автоматизации при производстве окатышей, организация сбора, первичная обработка и передача входной информации, предназначенной для реализации математических моделей должны удовлетворять следующим требованиям:

- частота сбора и обновления информации должна удовлетворять периодичности решения задач;
- значения параметров должны быть отфильтрованы методом скользящего среднего с глубиной фильтра равной отношению периодичности задачи к циклу обновления информации, но не менее 5;
- информация, представляемая для решения задач по различным каналам (от технологического объекта управления (ТОУ), пульта оператора) должна быть проверена на достоверность и синхронизирована во времени;
- при поступлении недостоверной информации для решения используется ее предыдущее достоверное значение, а при его отсутствии, выдается сообщение об ошибке.

Эффективность функционирования перечисленных задач верхнего уровня, решаемых с использованием математических моделей, а также всей системы в целом, зависит от организации взаимодействия верхнего уровня с другими подсистемами (визуализация, базовый уровень). В зависимости от этого, определяется структура комплекса технических средств системы управления.

В последнее время все большее распространение получают децентрализованные системы автоматизации, которые распределяют решение общей задачи между отдельными устройствами и одновременно реализуют централизованную систему управления, используемую для обслуживания, визуализации и оптимизации процессов в установке. Преимущества подобных систем могут быть использованы только в случае высокоэффективной системы связи, позво-

ляющей осуществлять обмен данными между различными частями установки.

Различные структуры КТС системы управления обжиговой машиной ОК-306 Лебединского ГОКа представлены на рис. 18.7 и 18.8.

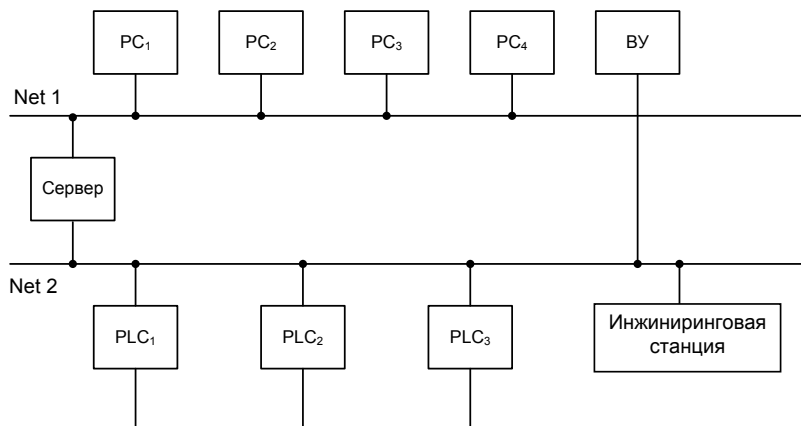


Рис. 18.7. Структура КТС системы управления обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа

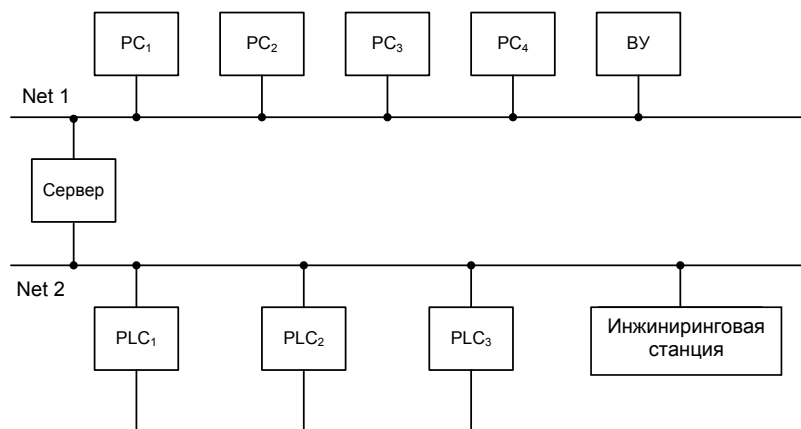


Рис. 18.8. Оптимальная структура КТС системы управления

На уровне процесса использовались контроллеры Simatic S7-400 фирмы Сименс (PLC_1, PLC_2, \dots). Преимущества их использования заключаются в следующем:

- возможность гибкого программирования, позволяющая реализовать практически любой алгоритм управления;
- высокая производительность. Время выполнения одного килобайта бинарных инструкций составляет 0,08–0,2 мс (зависит от используемого процессора);
- модульный принцип построения позволяет, в случае необходимости, расширять систему управления;
- возможность программирования со станции инжиниринга без негативного воздействия на функционирование системы;
- высокая надежность и др.

Для программирования контроллеров Simatic S7-400 использовались стандартные пакеты программ Step 7, CFC, SCF и др.

Система обслуживания и визуализации (PC₁, PC₂,...) состоит из ряда терминалов для отображения информации и ручного управления обжиговой машиной и двух – для работы с дымососами. Терминал представляет собой персональный компьютер промышленного исполнения, как правило, с экраном дисплея более 21". Система обслуживания и визуализации программируется под конкретный объект с использованием программного пакета WIN CC.

Система верхнего уровня (ВУ) реализуется на персональном компьютере промышленного исполнения с помощью специального программного обеспечения, построенного на основе математических моделей.

Инжиниринговая станция необходима для обслуживания, изменения и совершенствования программного обеспечения как базового уровня, так и системы визуализации. Здесь устанавливается специальное программное обеспечение, необходимое для программирования контроллеров (пакеты Step 7, CFC, SCF и др.) и системы визуализации (WIN CC).

Система связи состоит из трех шинных систем:

- шина для обслуживания и визуализации – Ethernet с протоколом обмена TCP/IP (скорость обмена 10 Мб/с);
- шина для связи контроллеров базового уровня – Industrial Ethernet (скорость обмена 10 Мб/с);
- шина для связи децентрализованной периферии с контроллерами – Profibus DP (максимальная скорость обмена 15 Мб/с, зависит от длины сегмента). Обмен информации между контроллером и

периферией происходит преимущественно циклично. Центральный контроллер (Master) считывает входную информацию с подчиненных ему устройств (Slave) и передает им выходную.

Применение сервера для обмена данными между подсистемами базового уровня (PLC_1, PLC_2, \dots) и уровня визуализации (PC_1, PC_2, \dots) и верхнего уровня (ВУ) позволяет использовать единую базу данных для всех этих подсистем. Кроме функции хранения информации в данном случае сервер выполняет роль шлюзового компьютера, разделяющего сеть базового уровня и уровня визуализации. Отличие схем состоит в том, в какой сети находится верхний уровень.

Для определения места расположения системы верхнего уровня рассмотрим информацию, которой она должна обмениваться с другими подсистемами.

Всю информацию ВУ можно разделить на следующие группы:

1. Входная информация.

1.1. Информация о ТОУ (информация от PLC_1, PLC_2, \dots). Представляет собой значения технологических параметров за определенный интервал времени с определенным периодом обновления. Должна быть синхронизирована по времени и содержать время ее сбора. Информация снимается периодически в зависимости от периодичности решения задачи. Инициатива запроса от ВУ по мере необходимости. Предварительная обработка информации включает в себя проверку достоверности данных; фильтрацию данных; преобразование единиц измерения.

1.2. Информация о ТОУ, данные лаборатории (информация от PLC_1, PLC_2, \dots). Представляет собой значения технологических параметров, вводимых оператором по данным лаборатории. Должна содержать время отбора проб. Инициатива передачи принадлежит оператору по мере обновления информации. Предварительная обработка информации включает в себя: проверку достоверности данных и преобразование единиц измерения. К особенностям данной информации можно отнести задержку поступления в 2–3 ч и переменная частота поступления.

1.3. Управляющая информация (информация от PLC_1, PLC_2, \dots). Представляет собой номер решаемой задачи ВУ и ее условия. Вводится оператором. Инициатива передачи принадлежит оператору по мере необходимости. Предварительная обработка информации включает в себя: проверку достоверности данных и преобразование

единиц измерения. К особенностям данной информации можно отнести переменную частоту поступления.

2. Выходная информация.

2.1. Косвенные измерения технологических параметров. Представляет собой расчетные значения технологических параметров. Информация поступает в систему визуализации и предназначена для оператора, ведущего процесс. Инициатива передачи принадлежит ВУ по мере выполнения расчетов. Должна содержать время, к которому относится расчет. К особенностям данной информации можно отнести переменную частоту обновления (зависит от времени расчета) и ее динамичность, т. е. изменение во времени.

2.2. Решение задачи оптимизации. Информация представляет собой расчетные значения уставок (заданий) локальным системам регулирования (поступает в систему базового уровня (PLC_1, PLC_2, \dots) и визуализации (PC_1, PC_2, \dots)) и расчетные прогнозные параметры для системы визуализации. Предназначена для оператора, ведущего процесс, а при работе в режиме on-line еще и для системы базового уровня. Инициатива передачи принадлежит ВУ по мере выполнения расчетов в зависимости от периодичности выполнения задачи. Должна содержать номер задачи и условия, к которым относится расчет. К особенностям данной информации можно отнести переменную частоту обновления (зависит от времени расчета) и ее динамичность, т. е. изменение во времени.

2.3. Решение задачи прогноза. Информация представляет собой отфильтрованные значения технологических параметров и расчетные показатели (косвенные измерения) в ответ на режим, введенный оператором (поступает в систему визуализации (PC_1, PC_2, \dots)). Предназначена для оператора, ведущего процесс. Инициатива передачи принадлежит ВУ по мере выполнения расчетов в ответ на запрос оператора. Должна содержать номер задачи и условия, к которому относится расчет. К особенностям данной информации можно отнести переменную частоту обновления (зависит от времени расчета) и ее статичность, т. е. неизменность во времени.

2.4. Управляющая информация. Представляет собой различные сообщения (например, об ошибках в задании параметров, о решаемой задаче и др.), поступающие в систему визуализации и предназначена для оператора, ведущего процесс. Инициатива передачи принадлежит ВУ.

2.5. Система связи с ВУ в сети базового уровня (см. рис. 18.7) и в сети визуализации (см. рис. 18.8) технологического процесса отличается количеством информации, передаваемой в каждой из данных сетей.

Разработка и внедрение на Лебединском ГОКе и эксплуатации АСУ ТП обеспечивало снижение удельного расхода топлива (природный газ) на 9,57 %; снижение удельного расхода электроэнергии на 7,9 %; увеличение производительности агрегата на 4,35 %.

Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение

На АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение» (ССГПО), г. Рудный, республика Казахстан в соответствии с научной и проектной разработкой технологии Научно-исследовательского института металлургической теплотехники ОАО «ВНИИМТ», была выполнена модернизация обжиговой конвейерной машины ОК-116 № 5 (первой из введенных в эксплуатацию в СССР) для термообработки железорудных окатышей. Выполненный объем технологической модернизации не имеет аналогов в мировой практике и включает оснащение обжиговой машины новым горном, переточным коллектором и инжекционными горелками, коренное изменение и усложнение схемы газопотоков, увеличение рабочей площади дополнительных тягодутьевых установок и др. Для более эффективной работы данного усложненного агрегата требовалась и разработка значительно модернизированной АСУ ТП* [18.65].

Реализация в составе АСУ ТП модернизированной обжиговой машины № 5 АО «ССГПО» верхнего имитационно-оптимизирующего уровня (ВИОУ), построенного на основе детерминированных математических моделей, алгоритмов их идентификации и оптимизации параметров технологического процесса позволило на новом уровне отработать технологические режимы термообработки окатышей, оптимизировать процесс и значительно улучшить технико-экономические показатели работы обжиговой машины.

Для адаптации математических моделей теплообмена, газодинамики, качества окатышей (прочности) и определения доли вредных

* В разработке и реализации АСУ ТП принимало участие ТОО «Системтехника», г. Алматы, Республика Казахстан.

подсосов в газоздушные камеры (ГВК) использованы показания стационарных контрольно-измерительных приборов (КИП), а также проведены дополнительные инструментальные технологические замеры, включая:

- измерение температуры в различных участках слоя: над слоем по горну обжиговой машины; внутри слоя (на границе «слой-постель»); на колосниках № на выходе из колосников, на различном расстоянии по ширине движущейся обжиговой тележки с помощью 4-х канального термолоттера (цифрового прибора, непрерывно записывающего результат измерения температуры в энергонезависимую память), позволяющего одновременно записывать в память прибора с частотой до одного измерения в секунду показания 4-х термопар ХА. В результате измерений получали температурные кривые термообработки по длине всей обжиговой машины, используемые в дальнейшем для адаптации математических моделей.

- замеры статического давления и динамического напора газобразных потоков по трактам проводили с помощью U-образного жидкостного манометра (либо цифрового прибора) и пневмометрической трубки конструкции ВТИ;

- для адаптации модели качества производили периодический отбор проб сырых и обожженных окатышей.

Анализ выдаваемых ВИОУ управляющих воздействий по рекомендуемому (оптимальному) температурному режиму в зонах сжигания топлива (над ГВК № 11–17), позволил оперативно оптимизировать проектный режим термо-обработки окатышей и обеспечить существенное снижение расхода топлива, увеличение производительности и повышение качества (прочность на сжатие, барабанный показатель) окатышей.

Основные «Советы» ВИОУ заключались в следующем.

1. Необходимость увеличения температуры в горне над ГВК № 11 (с 1140 до 1180–1210 °С) и над ГВК № 12 (с 1210 до 1240–1260 °С). Эту рекомендацию следует рассматривать как интенсификацию нагрева слоя окатышей.

2. Необходимость снижения температур над ГВК № 17 (с 1270 до 1100–1180 °С), а над ГВК № 16 (с 1300 до 1140–1180 °С). Это обеспечивает увеличение протяженности зоны рекуперации и увеличение скорости движения тепловой волны в слое окатышей.

3. Необходимость снижения максимальной температуры горных газов над слоем окатышей (ГВК № № 13–15) с 1290–1310 до 1240–1260 °С.

Это приближает ее к оптимальной, обеспечивающей максимальную прочность окатышей.

Последовательный переход к рекомендуемому ВИОУ режиму термообработки был выполнен, начиная с 15.04.2009.

Предварительно были внедрены в работу контуры регулирования расхода газа по горелочным устройствам с использованием датчиков давления, установленных перед ними, и перехода на «малый газ» при остановках обжиговой машины. При пуске обжиговой машины после останова в качестве уставок в контуры регулирования расхода газа поступали значения расходов газа, которые использовались до момента останова. Определено оптимальное время выполнения режимной карты «Пуск», которое составляло 90 секунд. Затем были уточнены настройки контуров регулирования (стабилизации) температуры газов в горне над ГВК № № 11–17.

В соответствии с рекомендациями ВИОУ были последовательно установлены и исследованы температурные режимы. При этом были увеличены температуры в горне над ГВК № 11, № 12, увеличена протяженность зоны рекуперации, снижены температуры на ГВК № 16 и реализованы рекомендации ВИОУ в части снижения максимальной температуры обжига и температуры в горне над ГВК № № 16–17. При этом относительная координата максимальной температуры по высоте слоя на границе зон рекуперации и охлаждения сместилась к его низу и составила 0,34 против 0,42–45, что способствовало более интенсивному прогреву нижних участков слоя, увеличению производительности и снижению удельного расхода природного газа.

В окончательном виде АСУ ТП включила в себя следующие подсистемы:

- управления термообработкой окатышей на обжиговой машине и окомкованием;
- поточно-транспортную и управления электроприводами;
- верхний уровень, построенный с использованием математических моделей для решения технологических задач управления.

Поточно-транспортная система обеспечивает требуемую логику работы электроприводов, необходимые блокировки и временные за-

держки, а также контроль готовности, состояния, параметров электродвигателей, оперативную диагностику неисправностей и их защиту, а по отдельным приводам – регулирование скорости их вращения.

В системе предусмотрено решение следующих задач регулирования: переноса высоты слоя сырых окатышей на роликовом укладчике; высоты слоя сырых окатышей; температуры в газоздушных камерах (ГВК) зон подогрева и обжига; температуры в ГВК зон обжига и рекуперации; температуры в горне над ГВК № 6 и 7; давления после дымососа Д4; разрежения в горне зоны сушки 1; давления в коллекторе К 1; давления в горне зоны сушки 2; температуры в горне и соотношения «газ-газ» над ГВК № 11–17; давления в горне зон подогрева и обжига; давления воздуха горения на обжиговую машину; температуры перед дымососами Д 1, Д 5, Д 6; температуры окатышей на разгрузке; разрежения в разгрузочной части обжиговой машины; разрежения в горне зоны охлаждения 2.

Также предусмотрены: логическая программа контроля и управления током двигателей технологических тягодутьевых установок (ТДУ); выдача задания системе участка окомкования на необходимую производительность по сырым окатышам; контроль параметров подаваемой воды для охлаждения элементов обжиговой машины; контроль вибрации и температур работы ТДУ. Важной особенностью системы является возможность гибкого конфигурирования различных режимов термообработки окатышей («Пуск», «Останов», «Режим 1»,...«Режим 5»), а также автоматического перехода с одного режима на другой. Наличие данных функций АСУ ТП позволяет быстро перестраивать технологический режим термообработки в зависимости от характеристик сырых окатышей, поступающих на термообработку, а также требуемого качества обожженных окатышей.

Верхний уровень автоматизации обжиговой машины включает решение следующих задач:

- оптимальное управление технологическим процессом по критерию минимума удельного расхода природного газа;
- косвенные измерения параметров.

Выход в действие верхнего уровня, построенного с использованием математических моделей, выполняется в три этапа.

На первом этапе проведены работы, относящиеся к технической составляющей реализации, включая контроль прохождения сигналов.

На втором – выполнены работы, обеспечивающие функционирование подсистемы в режиме «Совет» (off-line) (без воздействия на технологический процесс) и реализации задачи «косвенных измерений» технологических параметров.

Для этого было выполнено накопление исторических данных показаний контрольно-измерительных приборов по технологическим режимам работы обжиговой машины, на основе которых были уточнены параметры в части сбора и обработки исходных сигналов и данных и выдачи управляющих воздействий, определены допустимые пределы изменения входных параметров.

Выполнена адаптация математических моделей теплообмена, газодинамики и качества окатышей (прочности). Проверена адекватность математической модели технологическому процессу на основе контроля соответствия расчетных данных результатам технологических замеров (см. рис. 18.9).

Решение задачи косвенно измеряемых параметров обеспечивало оператора дополнительной информацией о ходе технологического процесса температуры в слое окатышей, расход теплоносителя по зонам, фильтруемого через слой, скорость фильтрации, порозность слоя, а также качество (прочность) обожженных окатышей. На данном этапе был выполнен также контроль и оценка значений выдаваемых управляющих воздействий (режим работы off-line).

На завершающем третьем этапе проводились работы по контролю за решением задачи оптимального управления технологическим процессом по критерию минимума удельного расхода природного газа в режиме on-line, когда оптимальные параметры автоматически выдаются в контуры регулирования, оптимизируя технологический процесс.

Использование в процессе выполнения пусконаладочных работ современных инструментальных средств измерения, а также подсистемы ВИОУ, построенной на основе автоматически адаптируемых на промышленном объекте математических моделей и алгоритмов оптимального управления, позволило оперативно провести процесс отладки и оптимизации техно-логических режимов термообработки окатышей и вывести показатели одной из первых в СССР (1968 г.) и модернизированной обжиговой машины № 5 АО «ССГПО» к наилучшим мировым аналогам.

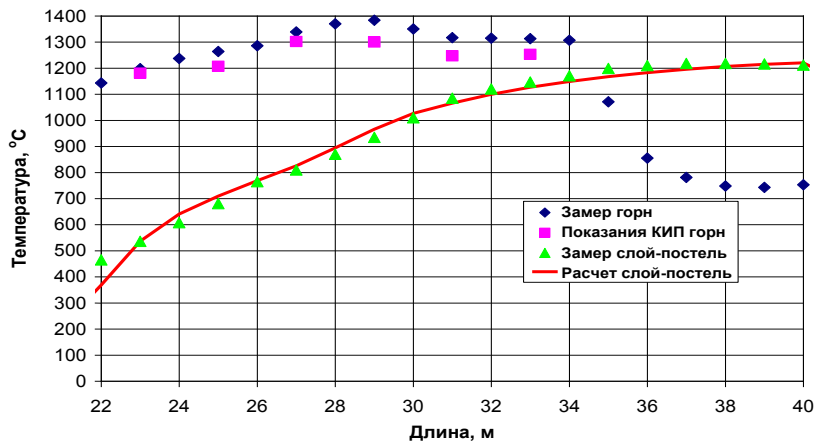


Рис. 18.9. Соответствие расчетных и измеренных температур по длине обжиговой машины

Некоторые частные проблемы

При создании и реализации АСУ ТП обжигом окатышей решалось много частных, но, конечно же, важных задач. Как отмечено, некоторые из этих решений представлены в [18.2]. Здесь приведены примеры расчетного анализа и оптимизации процессов при обжиге окатышей, работы выполнялись в содружестве УГТУ-УПИ (УрФУ) и НПВП «ТОРЭКС» (В. Г. Лисиенко, Г.М. Майзель, А.П. Буткарев, А.А. Буткарев и др.) [18.32; 18.45; 18.66].

Расчетный анализ и идентификация. Расчетным анализом были получены исходные данные, необходимые для проектирования новых обжиговых машин, модернизации действующих и решения вопросов управления технологическим процессом.

В частности, было показано, что реверсирование охлаждающего воздуха в зоне охлаждения приводит к увеличению средней температуры окатышей на разгрузке, причем, чем больше доля участка с прососом охлаждающего воздуха, тем ниже эффективность охлаждения:

– величина максимальной температуры окатышей на разгрузке при реверсивной схеме охлаждения также зависит от доли участка с продувом охлаждающего воздуха и, как правило, выше, чем в зоне охлаждения без реверсирования. Положительный эффект от реверсирования достигается лишь в том случае, если доля участка с

просасыванием воздуха не превышает 6–7 % (не более одной ГВК) от общей зоны площади охлаждения. Однако на практике и этот положительный результат может быть не достигнут;

– реализация реверсивной схемы охлаждения приводит к значительному увеличению удельного расхода электроэнергии на охлаждение и усложнению теплотехнической схемы агрегата, поэтому (с учетом сказанного выше) она не может быть рекомендована к практической реализации;

– на процесс охлаждения большое влияние оказывает температура охлаждающего воздуха. Так, например, при повышении температуры с 20 до 80 °С удельная производительность зоны охлаждения снижается на 23 %, а удельный расход электроэнергии увеличивается на 47 %. Если же при этом удельную производительность зоны поддерживать постоянной за счет увеличения давления воздуха (его расхода), то удельный расход электроэнергии увеличится на 124 % (в 2,24 раза);

– при использовании сбросного нагретого воздуха (газов) с температурой 180–350 °С в зоне охлаждения с целью утилизации тепла следует учитывать, что подача нагретого воздуха всегда приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии. Поэтому целесообразность использования нагретого воздуха должна рассматриваться на основе сопоставления дополнительных затрат электроэнергии и ожидаемой экономии топлива за счет достижения более высокой температуры воздуха, подаваемого из зоны охлаждения в зоны нагрева слоя окатышей.

С использованием расчетного анализа были решены вопросы структурной и параметрической идентификации технологического процесса охлаждения окатышей на конвейерной машине. Структурная идентификация осуществляется с использованием системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих теплообмен между газом и материалом в слое, а также уравнений газодинамики, учитывающих аэродинамическое сопротивление колосников, слоя донной постели и охлаждаемых окатышей и сопротивление продувам охлаждающего воздуха через уплотнения газовоздушных камер (ГВК). Параметрическая идентификация осуществлена на основе результата промышленных испытаний.

Минимизация расхода электроэнергии. На основе математического описания технологического процесса охлаждения окаты-

шей на конвейерной машине определено влияние технологических параметров на удельный расход электроэнергии.

Были сделаны выводы и даны следующие рекомендации:

Проводить процесс охлаждения окатышей целесообразно при умеренных давлениях в дутьевых камерах (3–4 кПа), при которых обеспечивается достаточно высокая удельная производительность (2,7–3,0 т/(м²•ч)) и относительно невысокий удельный расход электроэнергии. Повышение давления до 6,6 кПа приводит к увеличению удельной производительности на 27 %, однако удельный расход электроэнергии увеличивается при этом на 94 %.

Дутьевой режим в камерах зоны охлаждения необходимо было проводить таким образом, чтобы давления на всех камерах были либо одинаковыми, либо в первой секции были выше, чем во второй. Соотношение давлений в первой и второй секциях должно находиться в диапазоне от 1,0 до 2,1. Это обеспечивает минимальный удельный расход электроэнергии на охлаждение окатышей. Причем эта закономерность сохраняется при различном соотношении камер в первой и второй секциях.

При различной средней температуре слоя на входе в зону охлаждения (диапазон 1074–1175 °С), но одинаковой температуре на границе «слой–постель» (1164 °С) удельная производительность зоны, скорость фильтрации газов в слое и удельный расход электроэнергии изменяются незначительно. Однако с ростом средней температуры слоя пропорционально возрастает температура воздуха на выходе из него в первой секции и практически не изменяется во второй.

Зависимость удельной производительности зоны охлаждения от высоты слоя носит экстремальный характер, а удельный расход воздуха на охлаждение и электроэнергии в исследованном диапазоне высот слоя (0,3–0,8 м) уменьшается с увеличением высоты слоя. Последнее связано с увеличением завершенности теплообмена в слое с увеличением его высоты.

Порозность слоя оказывает решающее влияние на все показатели процесса охлаждения. При постоянном давлении в дутьевых камерах увеличение порозности слоя приводит к увеличению удельной производительности зоны охлаждения и удельного расхода воздуха на охлаждение, удельный расход электроэнергии при этом практически не изменяется. При постоянной удельной производительно-

сти зоны охлаждения даже незначительное увеличение порозности слоя приводит к существенному уменьшению удельного расхода электроэнергии.

При постоянной производительности зоны охлаждения зависимость удельного расхода электроэнергии от диаметра окатышей носит экстремальный характер с минимумом в диапазоне диаметра 14–16 мм. Удельный расход воздуха на охлаждение с увеличением диаметра непрерывно увеличивается, а необходимое давление в дуговых камерах уменьшается.

Полученные данные являлись основой для построения алгоритма минимизации удельного расхода электроэнергии.

Обобщение результатов

Обобщение проведенных в этом плане работ с анализом возможных дальнейших перспективных разработок выполнялись А.А. Буткаревым [18.72].

При этом отмечено, что эффективное управление режимами термообработки железорудных окатышей на обжиговых конвейерных машинах является одним из важных путей снижения энергетических затрат, повышения производительности и качества готовой продукции, увеличения ресурса работы оборудования. Поэтому вопросы исследования и совершенствования процессов управления, включая оптимизацию технологических режимов и их автоматическое поддержание (стабилизацию), весьма важны для улучшения показателей производства.

Как показывает многолетний опыт разработки и эксплуатации АСУ ТП термообработки окатышей, для обеспечения максимальной эффективности она должна включать следующие подсистемы: оптимального управления технологическим процессом с использованием математических моделей, алгоритмов идентификации его параметров и оптимизации; стабилизации параметров (контуры автоматического регулирования); управления нестационарными режимами работы машины («Пуск», «Останов»); технологических блокировок безопасности и пуска – останова механизмов, диагностики оборудования.

Основным критерием управления и оптимизации технологических процессов производства окатышей является максимум при-

были предприятия. Декомпозиция основного критерия позволяет определить источники и направления повышения экономической эффективности внедрения АСУ ТП, к которым относится уменьшение удельного расхода топлива (природного газа) и электроэнергии; наращивание объемов производства; повышение качества продукции (окатышей) и их стоимости; увеличение ресурса и надежности работы оборудования и др.

Суммарный годовой экономический эффект можно представить в виде выражения

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i, \quad (18.16)$$

где n – число источников эффективности АСУ ТП; \mathcal{E}_i – годовой экономический эффект от улучшения i -го показателя.

Для случая термообработки окатышей на обжиговых конвейерных машинах формула (18.16) принимает вид:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{п.г} + \mathcal{E}_{э} + \mathcal{E}_{пр} + \mathcal{E}_{кач} + \mathcal{E}_{об} + \mathcal{E}_{др},$$

где $\mathcal{E}_{п.г}$, $\mathcal{E}_{э}$, $\mathcal{E}_{пр}$, $\mathcal{E}_{кач}$, $\mathcal{E}_{об}$, $\mathcal{E}_{др}$ – экономические эффекты, получаемые за счет экономии природного газа, электроэнергии, увеличения объемов производства, улучшения качества окатышей, снижения затрат, необходимых на поддержание в работоспособном состоянии оборудования, и прочих затрат соответственно.

В свою очередь экономический эффект $\mathcal{E}_{кач}$ складывается из снижения затрат вследствие уменьшения количества рекламаций на качество продукции и соответствующих финансовых потерь, а также повышения эффективности работы последующих стадий (доменное производство, прямое получение железа (металлизация)). Все эти составляющие суммарного годового экономического эффекта увеличиваются в результате реконструкции, в том числе при внедрении АСУ ТП.

Обобщены данные исследований и внедрения разработок на ряде предприятий, включая Лебединский, Качканарский и Центральный ГОКи.

При внедрении подсистем оптимального управления, построенных на основе детерминированных математических моделей, реализация моделей, алгоритмов идентификации их параметров и

алгоритмов оптимального управления в реальном масштабе времени на работающем агрегате позволяет максимально формализовать процесс управления обжиговой машиной, уменьшить влияние субъективного человеческого фактора на управление и значительно улучшить показатели работы по сравнению с управлением самыми высококвалифицированными операторами.

Таким образом, анализ показывает значительную роль систем управления в совершенствовании процесса термообработки окатышей на обжиговых конвейерных машинах. Так, при реализации современной АСУ ТП за счет подсистемы стабилизации температур в горне обеспечивается снижение расхода топлива (природного газа) на 8,1 %. Дополнительно к этому благодаря повышению квалификации персонала, управляющего технологическим процессом, обеспечивается снижение расхода топлива на 2,8 % и удельного расхода электроэнергии на 3 %. При реализации в автоматическом режиме задач оптимального управления (по практическим данным) обеспечивается снижение расхода топлива на 9,57 %, удельного расхода электроэнергии на 7,9 % и увеличение производительности агрегата на 4,35 %. В целом в результате совершенствования АСУ ТП суммарная экономия природного газа составляет не менее 17,67 %.

В комплексе же с модернизацией конструкции и тепловых режимов внедрение АСУ ТП (опыт АО «ССГПО») позволило увеличить производительность обжиговой машины на 24,6 %, снизить расход природного газа более чем в два раза, снизить расход электроэнергии на 21,3 %, а также значительно улучшить экологическую обстановку.

Материалы по разработке и внедрению АСУ ТП на Лебединском ГОКе совместно с сотрудниками ГОКа представлялись на соискание премии Правительства РФ.

Использование математической модели теплообмена в плотном слое для оптимизации конструктивных и технологических параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах

Как уже отмечалось, в связи с развитием вычислительной техники важнейшим средством для исследования работы различных агрегатов и проектирования новых становится математическое моделирование. Использование математических моделей позволяет достаточно полно исследовать процесс с тем, чтобы затем пра-

вильно выбрать конструктивные и режимные параметры агрегата, обеспечивающие минимальные затраты энергоресурсов и высокое качество выпускаемой продукции. В области математического моделирования процесса производства железорудных окатышей на конвейерных машинах широкое применение находят работы Б.И. Китаева и его последователей [18.67; 18.68; 18.94; 18.95].

Использование математических моделей позволяет рассчитывать основные показатели технологического процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах, определяющие его экономическую эффективность [18.45; 18.70; 18.72]:

- удельную производительность агрегата ($G_{уд}$);
- удельный расход теплоты ($Q_{уд}$);
- удельный расход топлива ($V_{т.уд}$);
- удельный расход электроэнергии ($\mathcal{E}_{уд}$);
- показатели качества окатышей (прочность, металлургические свойства, химический состав и др.).

Они зависят, главным образом, от следующих конструктивных особенностей агрегата, а также от управляющих и возмущающих параметров:

- давления (разрежения) в газовоздушных камерах (ГВК) (P_j);
- распределения давления (разрежения) в ГВК;
- температуры теплоносителя (охлаждающего агента) на входе в слой ($T_{гj}$);
- распределения температур и теплоносителя на входе в слой по длине зон;
- температуры воздуха – горения и разбавления (в зонах сжигания топлива);
- коэффициента расхода воздуха – горения и разбавления (α_r, α_p);
- высоты слоя окатышей ($H_{сл}$) и донной постели;
- диаметра окатышей слоя ($d_{сл}$) и донной постели;
- порозности слоя окатышей (ε) и донной постели;
- распределения площади обжиговой машины по технологическим зонам;
- наличия или отсутствия реверсирования теплоносителя в технологических зонах (зона сушки, зона охлаждения);
- наличия и или отсутствия переточного коллектора и системы селективного отбора нагретого воздуха (воздуха – разбавления) из зоны охлаждения.

Математические модели [18.15; 18.32; 18.45; 18.68; 18.70], построенные с использованием основополагающих разработок теплообмена в слое, о кажущейся теплоемкости и коэффициенте массивности, предложенных Б.И. Китаевым, позволяет исследовать закономерности технологического процесса в широком диапазоне изменения перечисленных параметров, что совершенно недоступно на реальной обжиговой машине. В свою очередь, знание реальных закономерностей позволяет оценить влияние различных технологических параметров процесса и на основе этого построить наилучшим образом соответствующие алгоритмы оптимизации технологического процесса, а также определить перечисленные выше оптимальные конструктивные (соотношение площадей технологических зон, направление потоков теплоносителя) и режимные параметры.

Эти алгоритмы оптимизации и получаемые результаты в качестве третьего имитационно-оптимизирующего уровня управления являются основой создания алгоритмов управления реального времени, непосредственно используемых в АСУ ТП.

Постановки задач оптимизации представлены ниже в следующем виде [18.45; 18.61; 18.66; 18.69].

Критерий максимума производительности:

$$G_{\text{уд}} \rightarrow \max, \quad (18.17)$$

при ограничениях в виде равенств и неравенств:

$$\Theta_{\text{уд}} = \Theta_{\text{уд}1} + \Theta_{\text{уд}2} + \dots + \Theta_{\text{уд.п}} \leq \Theta_{\text{уд.зад}}; \quad (18.18)$$

$$Q_{\text{уд}} = Q_{\text{уд}1} + Q_{\text{уд}2} + \dots + Q_{\text{уд.п}} \leq Q_{\text{уд.зад}}; \quad (18.19)$$

$$V_{\text{н}} \leq V_{\text{н.о}}; \quad (18.20)$$

$$V_{\text{охл}} \leq V_{\text{охл.о}}; \quad (18.21)$$

$$T_{\text{м}} = T_{\text{м}}^{\text{зад}}(t, H); \quad (18.22)$$

$$T_{rj}^{\text{нп}} \leq T_{rj} \leq T_{rj}^{\text{вп}}; \quad (18.23)$$

$$T_{\text{тел}} \leq T_{\text{тел.о}}; \quad (18.24)$$

$$S_1 \cdot S_{уд1} = S_1 \cdot G_{уд1} = \dots = S_{п1} \cdot S_{уд.п} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд\Sigma} = G; \quad (18.25)$$

$$S_1 \cdot S_2 + \dots + S_{п} = S_{\Sigma}; \quad (18.26)$$

$$G_{удi} = G_{удi}(\Theta_{удi}, Q_{удi}); \quad (18.27)$$

в свою очередь:

$$\Theta_{удi} = \Theta_{удi}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}); \quad (18.28)$$

$$Q_{удi} = Q_{удi}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}). \quad (18.29)$$

Критерий минимума удельного расхода тепла (топлива):

$$Q_{уд} = Q_{уд1} + Q_{уд2} + \dots + Q_{уд.п} \rightarrow \min, \quad (18.30)$$

при ограничениях:

$$\Theta_{уд} = \Theta_{уд1} + \Theta_{уд2} + \dots + \Theta_{уд.п} \leq \Theta_{уд.зад}; \quad (18.31)$$

$$G_{уд} \geq G_{уд.зад}; \quad (18.32)$$

$$V_{н} \leq V_{н.о}; \quad (18.33)$$

$$V_{охл} \leq V_{охл.о}; \quad (18.34)$$

$$T_{м} = T_{м}^{зад}(t, H); \quad (18.35)$$

$$T_{rj}^{нп} \leq T_{rj} \leq T_{rj}^{вп}; \quad (18.36)$$

$$T_{тел} \leq T_{тел.о}; \quad (18.37)$$

$$S_1 \cdot S_{уд1} = S_1 \cdot G_{уд1} = \dots = S_{п1} \cdot S_{уд.п} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд\Sigma} = G; \quad (18.38)$$

$$S_1 \cdot S_2 + \dots + S_{п} = S_{\Sigma}; \quad (18.39)$$

$$G_{удi} = G_{удi}(\Theta_{удi}, Q_{удi}); \quad (18.40)$$

в свою очередь:

$$\mathfrak{E}_{уді} = \mathfrak{E}_{уді}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}); \quad (18.41)$$

$$Q_{уді} = Q_{уді}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}). \quad (18.42)$$

Критерий минимума удельного расхода электроэнергии:

$$\mathfrak{E}_{уд} = \mathfrak{E}_{уд1} + \mathfrak{E}_{уд2} + \dots + \mathfrak{E}_{уд.п} \rightarrow \min; \quad (18.43)$$

при ограничениях:

$$G_{уд} \geq G_{уд.зад}; \quad (18.44)$$

$$Q_{уд} = Q_{уд1} + Q_{уд2} + \dots + Q_{уд.п} \leq Q_{уд.зад}; \quad (18.45)$$

$$V_{н} \leq V_{н.о}; \quad (18.46)$$

$$V_{охл} \leq V_{охл.о}; \quad (18.47)$$

$$T_{м} = T_{м}^{зад}(t, H); \quad (18.48)$$

$$T_{rj}^{нп} \leq T_{rj} \leq T_{rj}^{вп}; \quad (18.49)$$

$$T_{тел} \leq T_{тел.о}; \quad (18.50)$$

$$S_1 \cdot S_{уд1} = S_1 \cdot G_{уд1} = \dots = S_{п1} \cdot S_{уд.п} = S_{\Sigma} \cdot G_{уд\Sigma} = G; \quad (18.51)$$

$$S_1 \cdot S_2 + \dots + S_{п} = S_{\Sigma}; \quad (18.52)$$

$$\mathfrak{E}_{уді} = \mathfrak{E}_{уді}(Q_{уді}, G_{уді}); \quad (18.53)$$

в свою очередь:

$$\mathfrak{E}_{уді} = \mathfrak{E}_{уді}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}); \quad (18.54)$$

$$Q_{уді} = Q_{уді}(t_{rj}, w_{rj} = w_{rj}(\Delta p_j, \xi, \dots), d_{сл}, H_{сл}, \text{ и т. д.}), \quad (18.55)$$

где $i = 1-n$ – номера технологических зон; j – точки по длине агре-

гата; $G_{\text{уд.зад}}$, $Q_{\text{уд.зад}}$, $\mathcal{E}_{\text{уд.зад}}$, $V_{\text{н.о}}$, $V_{\text{охл.о}}$, $T_{\text{тел.о}}$ – ограничения на удельную производительность, удельные расходы тепла (топлива) и электроэнергии, скорости нагрева и охлаждения, температуру тележки соответственно; $T_{\text{м}}^{\text{зад}}(t, H)$ – заданное распределение температуры материала; $T_{rj}^{\text{нп}}$, $T_{rj}^{\text{вп}}$ – ограничения по температуре газа на входе в слой (нижний и верхний пределы соответственно); $T_{\text{тел}}$ – температура обжиговой тележки; S_{Σ} , G – площадь и производительность обжиговой машины соответственно; w_{rj} – скорость фильтрации в слое; Δp_j – перепад давления в слое; ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления слоя.

Выполнение условий (18.20–18.22) позволяет гарантировать необходимое количество окатышей за счет ограничения скоростей нагрева и охлаждения слоя, а также обеспечения заданной температуры обжига. Условия (18.23; 18.24) обеспечивают сохранность огнеупорной футеровки горна и металла обжиговых тележек. Нетрудно также видеть, что условия (18.25) и (18.26), предложенные Я.Л. Белоцерковским, могут быть выполнены только в период конструирования обжигового агрегата. При их невыполнении одна из технологических зон будет лимитировать производительность установки. Для устранения такого конструктивного дефекта потребуется ее дорогостоящая модернизация. Из постановок задач (18.17–18.55) также следует, что вопросы оптимизации конструктивных и режимных параметров должны решаться комплексно на стадии проектирования, и конечные показатели работы агрегата будут зависеть, главным образом, от правильного выбора критериев оптимизации и соответствующих ограничений.

Таким образом, для решения перечисленных задач оптимизации необходимо, путем проведения численных экспериментов с помощью математических моделей, исследовать закономерности технологического процесса и определить соответствующие зависимости выходных параметров от входных как для каждой отдельной технологической зоны, так и для обжиговой машины в целом. В каждом конкретном случае постановки задач оптимизации (18.17–18.55) могут быть упрощены. Рассмотрение этих задач проведено на примере обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа [18.70].

Для получения достоверных данных по закономерностям технологического процесса проводили предварительную адаптацию

математических моделей с использованием опытных данных, полученных в результате промышленных испытаний обжиговой машины ОК-306 № 4 Лебединского ГОКа, на которой проведена реконструкция и она оснащена современной системой управления на базе технических средств фирмы «Сименс».

Адаптацию проводили с использованием соответствующего алгоритма [18.42; 18.70].

Для более глубокого и детального исследования процессов, происходящих на обжиговой машине, последняя была разделена на отдельные технологические зоны.

В соответствии с требованиями технологии каждая зона в зависимости от ее функционального назначения должна обеспечивать:

- зоны сушки, нагрева и обжига – заданную среднюю по высоте слоя температуру окатышей на выходе из зоны;
- зона рекуперации – заданную температуру нижних участков слоя;
- зона охлаждения – заданную среднюю по высоте слоя окатышей и донной постели температуру на разгрузке, которая должна быть меньше 100 °С.

Затем, на основе опытных данных, с использованием математических моделей получено распределение температур по высоте слоя на границах технологических зон, а также средняя по массе температура слоя на действующей обжиговой машине ОК-306.

Далее исследовали каждую технологическую зону в отдельности. При проведении численного эксперимента вышеназванные условия поддерживали постоянными при изменении исследуемых параметров ($T_{гг}$, $d_{сл}$, $H_{сл}$ и др.) за счет изменения производительности зоны (при постоянном давлении в ГВК) или давления в ГВК (при постоянной производительности).

Расчет теплообмена и газодинамики в слое, а также ряда исследуемых показателей (удельные расходы тепла, топлива, электроэнергии и др.) в каждой конкретной зоне, проводили с использованием математических моделей с учетом соответствующих ограничений по максимальным температурам в зонах, скоростям нагрева и охлаждения слоя и др. Эти условия позволяют обеспечить необходимое качество окатышей и сохранность оборудования обжигового агрегата.

Для выявления характера зависимостей строили графики основных показателей процесса $\mathcal{E}_{\text{уд}}, V_{\text{м.уд}}, Q_{\text{уд}}, P, G_{\text{уд}}$ как функции от исследуемого параметра ($T_{\text{рj}}, d_{\text{сл}}, H_{\text{сл}}$ и др.), а также номограммы $\mathcal{E}_{\text{уд}} = f_i(G_{\text{уд}i})$ и др.

После декомпозиции (разбиения исследуемой задачи на отдельные подзадачи) задачи исследования и подробного рассмотрения каждой зоны (сушки, подогрева, обжига, рекуперации, охлаждения) в отдельности с целью определения оптимальных, в соответствии с выбранным критерием, параметров, возникает необходимость решения задачи определения оптимальных параметров объекта в целом или, другими словами, задача синтеза.

При этом одной из главных является задача оптимизации соотношения площадей и выбора режимов отдельных технологических зон при заданной суммарной площади агрегата. Необходимость решения данной задачи можно легко видеть при рассмотрении крайнего случая: для зоны охлаждения отводим площадь в размере, например, 1 % от площади агрегата. Тогда для обеспечения заданной производительности этой зоны необходимо в ГВК обеспечить огромные давления, что либо невыгодно с точки зрения удельного расхода электроэнергии, либо вообще технически недостижимо. В противоположность этому на оставшиеся зоны приходится 99 % площади агрегата, и они работают с недогрузкой. Таким образом, с точки зрения минимума удельного расхода электроэнергии существует оптимальное распределение площадей отдельных технологических зон обжигового агрегата. Упрощенная постановка задачи (18.43–18.55) принимает следующий вид:

Требуется найти вектор (S_1, S_2, \dots, S_n) так, чтобы

$$\mathcal{E}_{\text{уд}} = \mathcal{E}_{\text{уд}1} + \mathcal{E}_{\text{уд}2} + \dots + \mathcal{E}_{\text{уд}n} \rightarrow \min; \quad (18.56)$$

при ограничениях:

$$G_{\text{уд}} \geq G_{\text{уд.зад}}; \quad (18.57)$$

$$V_{\text{н}} \leq V_{\text{н.о}}; \quad (18.58)$$

$$V_{\text{охл}} \leq V_{\text{охл.о}}; \quad (18.59)$$

$$T_{mi} = T_{mi}^{\text{зад}}; \quad (18.60)$$

$$T_{rj}^{\text{нп}} \leq T_{rj} \leq T_{rj}^{\text{вп}}; \quad (18.61)$$

$$T_{\text{тел}} \leq T_{\text{тел.о}}; \quad (18.62)$$

$$S_1 \cdot G_{\text{уд1}} = S_1 \cdot G_{\text{уд1}} = \dots = S_{\text{п1}} \cdot G_{\text{уд.п}} = S_{\Sigma} \cdot G_{\text{уд}\Sigma} = G; \quad (18.63)$$

$$S_1 \cdot S_2 + \dots + S_{\text{п}} = S_{\Sigma}; \quad (18.64)$$

$$\Theta_{\text{уд}i} = f_i(G_{\text{уд}i}), \quad (18.65)$$

где T_{mi} , $T_{mi}^{\text{зад}}$ – температуры материала на выходе из i технологической зоны текущая и заданная соответственно.

Задачу решали методом покоординатного спуска [18.71] для зон подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения с использованием полученных зависимостей $\Theta_{\text{уд}i} = f_i(G_{\text{уд}i})$. Сущность этого метода раскрывалась в том, что вначале изменяли площадь одной из зон до тех пор, пока не достигали минимума удельного расхода электроэнергии $\Theta_{\text{уд}}$ по данной координате (использовали метод золотого сечения [18.71]). Далее аналогичные действия осуществляли с оставшимися переменными. Данный алгоритм повторяли до тех пор, пока изменение хотя бы одной из переменных приводило к уменьшению целевой функции.

Решение задачи позволяет оптимальным образом, в соответствии с выбранным критерием (минимум удельного расхода электроэнергии), определить площади и соответственно удельные производительности каждой технологической зоны.

В данном примере перераспределение площадей и давлений между зонами (табл. 18.2) позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 23 % по сравнению с базовым распределением.

Анализ этих данных показывает, что для оптимального с точки зрения минимума удельного расхода электроэнергии распределения площади зон подогрева, обжига и рекуперации необходимо увеличить, а площадь зоны охлаждения уменьшить со 135 до 105,6 м², так как после модернизации (исключения реверсирования газового

потока) она будет иметь большой резерв по производительности. Давления (разрежения) в ГВК зоны охлаждения при этом должны быть увеличены, а в зонах нагрева, наоборот, уменьшены.

Таблица 18.2

Базовые и рекомендуемые параметры обжиговой машины

Название зоны	Параметры обжиговой машины ОК-306							
	Базовые				Оптимальные (расчетные)			
	S_p , м ²	$G_{уд}$, т/(м ² ·ч)	P , кПа	$\mathcal{E}_{уд}^{1)}$, кВт ч/т	S_p , м ²	$G_{уд}$, т/ (м ² ·ч)	P , кПа	$\mathcal{E}_{уд}^{1)}$, кВт ч/т
Подогрев	36	8,11	3,7		45,48	6,42	2,01	
Обжиг	45	6,49	3,67		49,25	5,93	2,99	
Рекуперация	27	10,81	7,50		42,67	6,84	3,05	
Охлаждение	135	2,16	1,86		105,6	2,77	3,17	
Машина:								
без зоны сушки	243	1,2		3,93	243	1,2		3,06
с зоной сушки	306	0,95			306	0,95		

¹⁾ На фильтрацию слоя и подсосы (продуву)

Следует отметить, что полученные оптимальные конструктивные и режимные параметры в процессе эксплуатации обжиговой машины будут изменяться в связи с изменением характеристик слоя окатышей и донной постели (влажность, диаметр гранулометрический состав и др.), поэтому они должны корректироваться путем реализации соответствующих алгоритмов управления. В полном объеме предлагаемые оптимальные параметры могут быть реализованы только при создании новой обжиговой машины, так как при модернизации действующей приходится учитывать конкретные условия производства. Так, например, не всегда и не во всех зонах удастся перераспределить их площади оптимальным образом в связи с тем, что приходится использовать существующие газоходы, горелочные устройства, средства регулирования газопотоков, высоконапорные дымососы. Иногда в цехе нет места для установки дополнительного оборудования или невозможно установить в нужном месте существующее (например, дымососы). Однако даже ча-

стичная реализация предлагаемых мероприятий, как правило, дает существенный эффект.

Необходимо отметить, что задача была решена для обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа и ее решение зависело от совокупности всех технологических параметров. В общем случае задачи оптимизации естественно должны решаться в каждой конкретной ситуации, т. е. для каждого агрегата, вида сырья, режима термообработки и др. индивидуально.

Таким образом, создание обжиговых агрегатов с учетом вышеизложенного позволяет уже на стадиях проектирования агрегата заложить оптимальную, в соответствии с выбранным критерием, структуру и тем самым получить больший экономический эффект, чем в случае оптимизации только режимных параметров (их количество ограничено) в рамках ограничений, заложенных в структуру агрегата при его проектировании. При неудачном выборе структуры агрегата оптимизация режимных параметров позволяет получить определенный эффект, но это не устраняет ошибок проектирования, в результате чего агрегат будет работать с повышенными энергозатратами.

Следовательно, наибольший экономический эффект можно получить, сочетая оптимизацию конструктивных параметров при проектировании агрегата и оптимизацию технологических параметров во время его эксплуатации.

Таким образом, была предложена методика исследования технологического процесса обжига окатышей с целью получения исходных данных для оптимизации его технологических и конструктивных параметров. Осуществлена обобщенная постановка задач оптимизации параметров процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах по различным критериям (максимум производительности, минимум удельного расхода тепла (топлива), минимум удельного расхода электроэнергии) при соответствующих ограничениях в виде равенств и неравенств.

В качестве примера было выполнено решение задачи минимизации удельного расхода электроэнергии на обжиговой конвейерной машине ОК-306 Лебединского ГОКа путем нахождения оптимального распределения рабочей площади агрегата между отдельными технологическими зонами и режимных параметров (температуры, давления и др.) [18.45; 18.66; 18.70; 18.72].

Моделирование переходных режимов обжига окатышей на конвейерных машинах

Как указывалось ранее, создание высокоэффективных систем автоматизации возможно лишь при соответствующем уровне технических средств и математического описания их статики и динамики. Последнее позволяет рассчитывать переходные процессы по различным каналам, определять влияние нестационарности различных технологических параметров на качество готовой продукции и рационально подойти к вопросам проектирования систем автоматизации (определению контуров регулирования, вида корректирующих звеньев и расчету их параметров). В данном случае это относится к управлению процессами обжига окатышей на конвейерных машинах.

Нестационарность технологического процесса производства окатышей обусловлена, главным образом, нестабильностью характеристик сырых окатышей (влажность, гранулометрический состав, химсостав и др.), а также нестабильностью производительности отделения окомкования, обусловленной нестабильностью работы весодозаторов.

В частности, анализ сигналов КИП обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа показал, что на практике амплитуда низкочастотных колебаний нагрузки, обусловленная неравномерным (пульсирующим) поступлением сырых окатышей, достигает 30 % от номинальной, а изменение скорости ленты обжиговой машины составляет ± 25 % от средней с периодом колебания от 10 мин до 1 ч (рис. 18.10) [18.45; 18.70].

При этом наблюдается корреляция скорости ленты с такими важными сигналами, как температуры в газовоздушных камерах (ГВК) и в горне, что свидетельствует о неудовлетворительной работе существующих систем автоматического регулирования (САР). По данным института Механообрчермет среднеквадратичное отклонение производительности отечественных дозаторов ДТ-31 составляет ± 10 %, а лучших зарубежных дозаторов фирмы Шенк – $\pm 6,8$ %. Это соответствует доверительному интервалу для вероятности 0,95, соответственно, ± 20 % и $\pm 13,2$ %. Таким образом, в производственных условиях наблюдается непрерывное изменение производительности обжиговой машины во времени, обусловленное особенностями протекания технологического процесса.

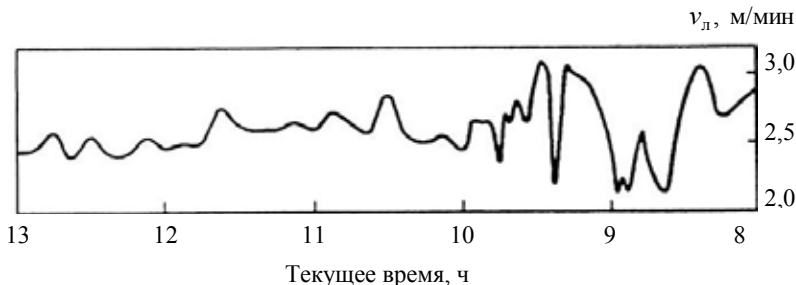


Рис. 18.10. Изменение скорости обжиговой машины ОК-306 Лебединского ГОКа во времени (фрагмент диаграммы)

Для исследования динамики процесса и рассмотрения возможности ее использования в процессах управления реализована двухмерная динамическая модель, представляющая собой систему уравнений типа [18.15; 18.32; 18.45; 18.69; 18.70; 18.72].

$$\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} \varepsilon_{\Gamma} \left[\frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial t} + v_{\Gamma} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial h} \right] = - \frac{\alpha_v (T_{\Gamma} - T_{\text{м}})}{m}; \quad (18.66)$$

$$\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} (1 - \varepsilon) \left[\frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial t} + v_{\text{л}} \frac{\partial T_{\text{л}}}{\partial l} \right] = \frac{\alpha_v (T_{\Gamma} - T_{\text{м}})}{m}; \quad (18.67)$$

$$0 \leq l \leq L, \quad 0 \leq h \leq H, \quad 0 \leq \tau \leq T;$$

краевые условия:

$$T_{\Gamma}(0, l, t) = \Psi_1(l, \tau); \quad t_{\Gamma}(h, l, 0) = \Psi_2(h, l)$$

$$T_{\text{м}}(h, 0, t) = \Psi_3(h, \tau); \quad t_{\text{м}}(h, l, 0) = \Psi_4(h, l),$$

где T_{Γ} , $T_{\text{м}}$ – температура газа и материала слоя соответственно; l – координата по длине L зоны теплообмена; h – координата по высоте H зоны теплообмена; t , T – текущее время и продолжительность процесса; ε – порозность слоя; ρ_{Γ} , $\rho_{\text{м}}$ – плотности газа и окатышей; c_{Γ} , $c_{\text{м}}$ – удельные эффективные теплоемкости газа и материала слоя;

v_{Γ}, v_{Γ} – скорости подачи в зону теплообмена газа и материала слоя; α_v – объемный коэффициент теплоотдачи; $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$ – заданные функции распределения температур; m – коэффициент массивности.

Было принято, что теплофизические свойства в уравнениях (18.66) и (18.67) являются нелинейными функциями температуры. Задача была реализована для всех технологических зон обжиговой конвейерной машины, включая зоны сушки, нагрева и охлаждения.

Уравнение (18.66) упрощается, если принять, что инерционность газа на два – три порядка меньше инерционности материала дисперсного слоя, тогда уравнение (18.66) можно записать в виде

$$\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} w_{\Gamma} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial h} = \frac{\alpha_v (T_{\Gamma} - T_{\text{м}})}{m}, \quad (18.68)$$

где $w_{\Gamma} = v_{\Gamma} \varepsilon$ – скорость газа на свободное сечение слоя.

Решение системы уравнений осуществлялось методом конечных разностей в сочетании с методом итераций по явной схеме, причем начальные условия $T_{\text{м}}(h, l, 0)$ рассчитывали в соответствии с системой уравнений, описывающих установившийся режим (модель статики):

$$\rho_{\Gamma} c_{\Gamma} v_{\Gamma} \varepsilon \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial h} = - \frac{\alpha_v (T_{\Gamma} - T_{\text{м}})}{m}; \quad (18.69)$$

$$\rho_{\text{м}} c_{\text{м}} (1 - \varepsilon) v_{\Gamma} \frac{\partial T_{\text{м}}}{\partial l} = - \frac{\alpha_v (T_{\Gamma} - T_{\text{м}})}{m}. \quad (18.70)$$

Шаг по каждой координате выбирали исходя из условия независимости температуры материала и газ от уменьшения последнего.

С использованием данной модели построены переходные процессы для режима обжига окатышей, практически используемого на обжиговой конвейерной шине ОК-306 Лебединского ГОКа. В качестве входных воздействий в виде ступенчатой функции нами выбраны температура газа в горне, скорость его фильтрации в слое и скорость ленты. Выходом системы считали температуру материала на границе слой – постель в конце зоны рекуперации.

Данную модель можно использовать для исследования влияния нестандартности различных технологических параметров (высота слоя, диаметр окатышей, температура в горне, разрежение в газоздушных камерах, скорость ленты и др.) на температурное поле в слое железорудных окатышей при их термообработке на обжиговых конвейерных машинах.

С помощью другой модели [18.15; 18.32; 18.70; 18.92], построенной с использованием метода обобщенных переменных (теории подобия), оценивали прочность промышленных окатышей Лебединского ГОКа.

Прочность окатышей на сжатие рассчитывали, исходя из выражения:

$$\sigma_{\text{отн}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{max}}} = f\left(\frac{t_i}{t_{\text{max}}}\right), \quad (18.71)$$

откуда

$$\sigma_i = \sigma_{\text{max}} f\left(\frac{t_i}{t_{\text{max}}}\right), \quad (18.72)$$

где σ_i , σ_{max} , $\sigma_{\text{отн}}$ – прочность окатышей в слое – текущая, максимальная, относительная; t_i , t_{max} – температура окатышей – текущая и при которой достигается их максимальная прочность.

Зависимость относительной прочности окатышей от относительной температуры приведена в [18.90].

Максимальная прочность окатышей и температура, при которой она достигается, являются функцией количества шлакообразующих оксидов в шихте для производства окатышей ($\text{CaO} + \text{SiO}_2$):

$$\sigma_{\text{max}} = f(\text{CaC} + \text{SiO}_2); \quad (18.73)$$

$$t_{\text{max}} = f(\text{CaC} + \text{SiO}_2). \quad (18.74)$$

Среднюю по слою прочность окатышей рассчитывали исходя из их прочности в каждом монослое:

$$\sigma_{\text{cp}} = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma_i(H) dh, \quad (18.75)$$

где H – высота слоя.

В качестве примера с помощью математических моделей обжиговой машины проведена оценка влияния колебаний скорости ленты на динамику изменения температур в слое окатышей и донной постели (рис. 18.11–18.13), а также на прочность готового продукта (см. рис. 18.13, б) при его обжиге на обжиговой конвейерной машине ОК-306 Лебединского ГОКа [18.15; 18.32; 18.70; 18.92]. Эти примеры в конспективном виде также представлены в [18.2].

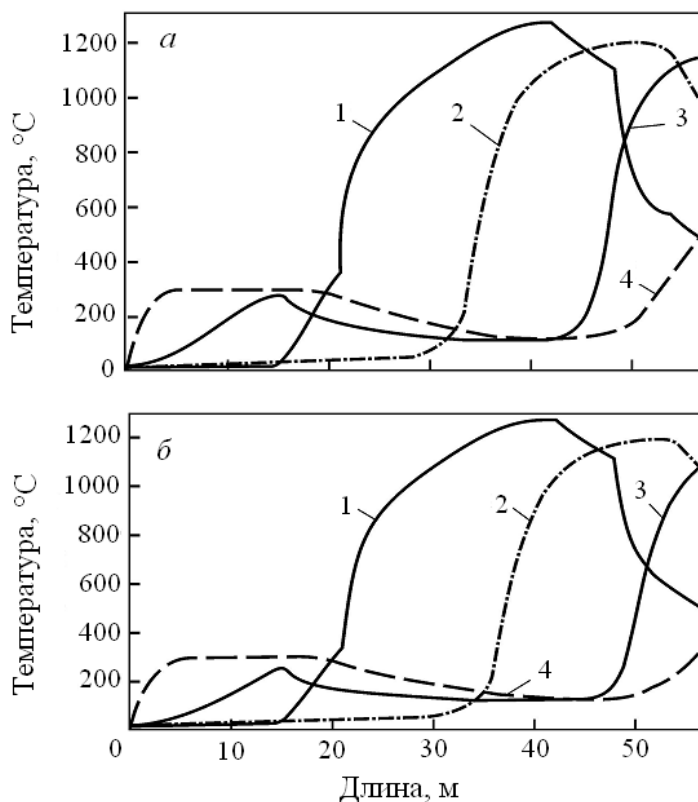


Рис. 18.11. Изменение температуры окатышей и донной постели по длине обжиговой машины и влияние однократного скачкообразного возмущения скорости ленты (в соответствии с рис. 18.12, в): 1 – верхний участок слоя; 2 – средний; 3 – нижний участок слоя (граница слой – постель); 4 – постель по границе с колосниками;

а – $t = 0$; $v = 2,6$ м/мин; б – $t = 510$ с; $v = 3,1$ м/мин

На рис. 18.11, *б* ($t = 510$ с) показано распределение температур в слое через 8 мин после изменения скорости ленты с 2,6 до 3,1 м/мин ($t = 30$ с). За это время температура на границе слой – постель (кривая 3) снизилась с 1151 °С (рис. 18.11, *а*; $t = 0$) до 1087 °С, т. е. на 64 °С. Такое снижение температуры приводит к снижению прочности окатышей. На рис. 18.12, *а*; 18.13, *а* показаны графики изменения температур на границе с зоной охлаждения ($L = 57$ м) во времени (динамические характеристики).

Анализ результатов расчетов показывает, что увеличение скорости ленты приводит, с одной стороны, к уменьшению удельного расхода топлива, а с другой – к существенному снижению прочности окатышей (см. рис. 18.12, *б*), обусловленному уменьшением температур обжига, особенно в нижних участках слоя.

Поэтому для повышения показателей работы обжиговых машин необходимо стабилизировать скорость ленты (например, путем стабилизации работы весодозаторов), либо компенсировать влияние ее неустойчивости на температурное поле в слое окатышей с помощью эффективной системы управления.

Разработанная модель динамики процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах совместно с математическим описанием динамики датчиков и исполнительных механизмов использована для расчета динамических характеристик технологических параметров систем автоматического регулирования (температура, давление), что необходимо, как известно, для синтеза САР.

Следует также учесть, что применение известных методов статической оптимизации процесса термообработки окатышей на конвейерных машинах может дать ожидаемый экономический эффект лишь при надежной работе систем автоматического регулирования контролируемых технологических параметров, т. е. при обеспечении достаточной стабильности процесса обжига. Необходимые для этого воздействия оценить в каждом случае можно с помощью математической модели динамики процесса теплообмена.

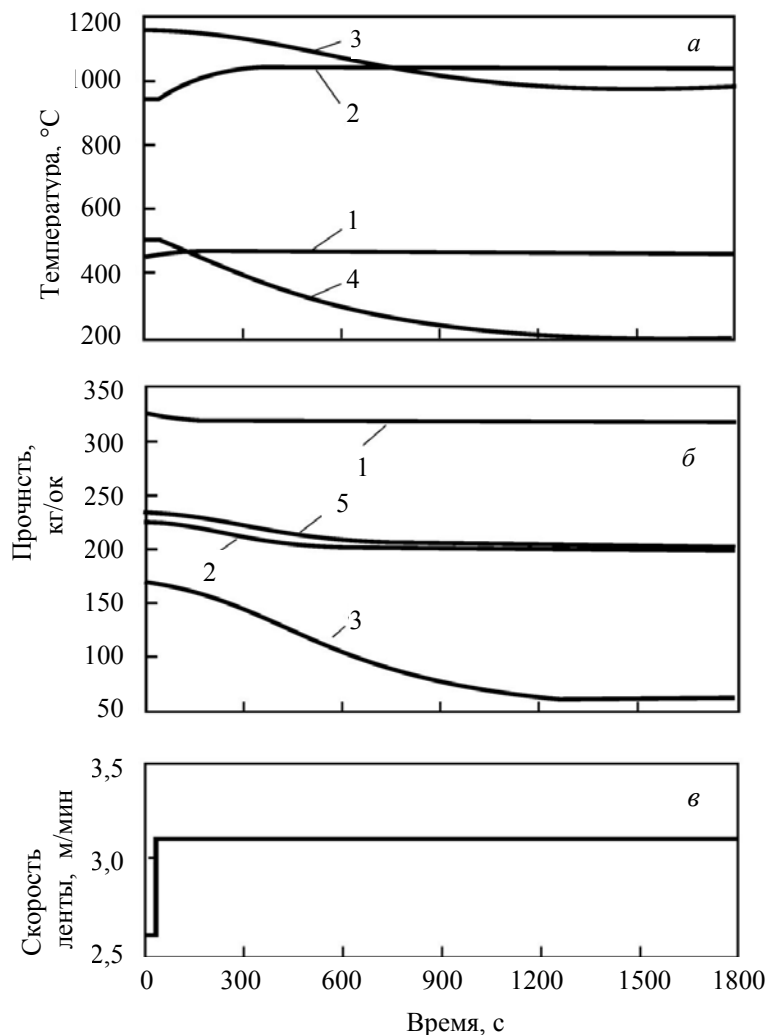


Рис. 18.12. Изменение температуры (*а*), прочности (*б*) окатышей во времени при нанесении однократного скачкообразного возмущения по скорости ленты (*в*): 1, 2, 3, 4 – то же, что на рис. 18.11; 5 – средняя по слою прочность окатышей

Отметим, что разработанные модели процесса обжига окатышей нашли практическое применение на созданной впервые в мировой практике автоматизированной системе управления на обжиговой

машине № 4 Лебединского ГОКа, включающей в верхнем уровне управления имитационно-оптимизирующий контур и блок параметрической идентификации. Система работает со значительной экономией топлива и электрической энергии (см. п. 18.3.1). Материалы данных разработок представлялись на премию Правительства РФ.

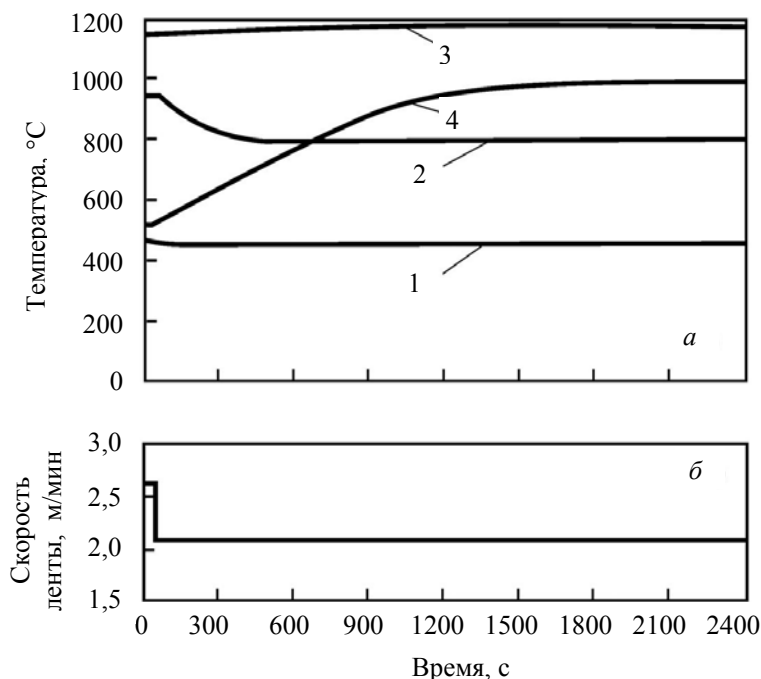


Рис. 18.13. Изменение температуры (а) окатышей во времени в зависимости от колебаний скорости ленты (б). Цифры у кривых – то же, что и на рис. 18.11

Параметрическая идентификация при управлении обжигом окатышей с использованием детерминированной модели

Как отмечалось, применительно к обжиговой конвейерной машине, пожалуй, впервые в процессе управления, при проведении идентификации применена детерминированная модель объекта с распределенными параметрами (см. уравнения (18.59), (18.70)), функционирующая на объекте в реальном времени (разработки

А.А. Буткарева, А.П. Буткарева под руководством В. Г. Лисиенко [18.42; 18.70; 18.92].

Способ термообработки окатышей осуществляется на конвейерной машине, которая представляет собой тепловой агрегат конвейерного типа с развитой системой газовых потоков и непрерывным процессом загрузки, термообработки и разгрузки окатышей, предназначенных для сушки, подогрева, обжига и охлаждения обрабатываемого материала.

В процессе термообработки окатыши последовательно проходят технологические зоны сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения.

Теплоноситель для осуществления процесса термообработки окатышей получают путем сжигания газообразного, жидкого и, в отдельных случаях, твердого топлива.

Таким образом, за основу была положена математическая модель объектами с распределенными параметрами (18.69), (18.70). При реализации этой модели использовано положение о неразрывной связи тепловых и газодинамических процессов в слое. Эта модель применена (при наличии также модели качества) как инструмент для определения температурного режима термообработки с целью обеспечения необходимых окатышей непосредственно на обжиговой машине.

Опыты использования математических моделей в составе программного обеспечения АСУ ТП обжига окатышей показали, что их параметры необходимо корректировать не только в ходе разработки, но и в процессе функционирования системы. Необходимость параметрической идентификации вызвана непредсказуемыми изменениями характеристик слоя в процессе обработки. Так, плотность укладки слоя изменяется за счет усадки отдельных гранул, изменения типа укладки, разрушения окатышей и заполнения слоя пустой мелочью.

Поэтому в расчетную схему введен алгоритм параметрической идентификации, позволяющий корректировать коэффициент газодинамического сопротивления слоя путем уточнения его порозности.

Условие завершения итераций при параметрической идентификации:

$$\frac{|t_p - t_\phi|}{t_\phi} \leq 0,01,$$

где t_p , t_ϕ – расчетная и фактическая (измеренная) температура теплоносителя на выходе из слоя.

Алгоритм идентификации в условиях АСУ ТП должен иметь быстроедействие, сравнимое с быстрымдействием алгоритма, реализующего модель, что ограничивает применимость известных довольно сложных итерационных методов.

Использование методов обобщенных переменных позволило создать следующий алгоритм.

Теплообмен в слое был описан системой уравнений (18.69), (18.70), преобразованных к виду:

$$-(\partial T_{\Gamma} / \partial Y)(1/k_{\text{H}}) = T_{\Gamma} - T_{\text{M}}, \quad (18.76)$$

$$(\partial T_{\Gamma} / \partial Y)(1/k_{\text{H}}) = T_{\Gamma} - T_{\text{M}}, \quad (18.77)$$

где безразмерные параметры

$$k_{\text{H}} = 6\alpha_{\text{F}}(1 - \varepsilon)H/mGC_{\Gamma}d; \quad k_{\text{M}} = 6\alpha_{\text{F}}l/C_{\text{M}}m\rho_{\text{M}}u_{\text{д}}d \quad (18.78)$$

являются функциями температуры.

В уравнениях (18.76)–(18.78)

$$Y = y / H; \quad X = x / l. \quad (18.79)$$

относительные координаты по высоте и длине слоя, соответственно; T_{Γ} , T_{M} – температура газа и материала, соответственно, °C; y , x – координаты по высоте и длине слоя, соответственно, м; H , l – высота и длина слоя, соответственно, м; α_{F} – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °C); ε – порозность слоя; m – коэффициент массивности; $G = w\rho_{\Gamma}$ – массовый расход газа через слой, кг/(м² · ч); C_{Γ} , C_{M} – теплоемкость газа и материала слоя, кДж/(кг · К); d – диаметр кусков слоя, м; ρ_{M} – кажущаяся плотность материала слоя, кг/м³; $u_{\text{д}}$ – скорость движения слоя, м/с.

Из уравнений (18.76) и (18.77) были получены выражения для относительных температур газа и материала слоя.

$$\theta_{\Gamma} = f(k_{\text{H}}, k_{\text{и}}, Y, X); \quad (18.80)$$

$$\theta_{\text{мг}} = f_1(k_{\text{H}}, k_{\text{и}}, Y, X); \quad (18.81)$$

$$\text{где } \theta_{\Gamma} = (T_{\Gamma} - T_{\text{M}}^{\text{H}})/(T_{\Gamma}^{\text{H}} - T_{\text{M}}^{\text{H}}); \quad \theta_{\text{M}} = (T_{\text{M}} - T_{\text{M}}^{\text{H}})/(T_{\Gamma}^{\text{H}} - T_{\text{M}}^{\text{H}}) \quad (18.82)$$

относительные температуры газа и материала слоя; T_{Γ}^H , T_M^H – температура газа и материала, °С.

Таким образом, для одинаковых относительных координат (Y и X) относительные температуры в слое определяют величиной безразмерных параметров k_n и k_{in} . Для анализа этих параметров их необходимо было преобразовать.

Коэффициент теплоотдачи в слое для ламинарного режима течения газа определяется выражением:

$$\alpha_F = 0,106 \rho_{\Gamma} \lambda_{\Gamma} w / \eta, \quad (18.83)$$

где ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³; w – скорость фильтрации газа, м³/с; λ_{Γ} – теплопроводность газа, Вт/(м·°С); η – вязкость газа, кг/(м·с).

При подстановке уравнения (18.83) в (18.78), получено:

$$k_n = 0,636 \rho_{\Gamma} \lambda_{\Gamma} (1 - \varepsilon) H / m \rho_{\Gamma} C_{\Gamma} d\eta; \quad (18.84)$$

$$k_{in} = 0,636 \rho_{\Gamma} \lambda_{\Gamma} w l / C_M m \rho_M u_{\Gamma} d\eta. \quad (18.85)$$

При изменении плотности укладки изменяется высота слоя и его порозность, а массовый расход материала остается постоянным:

$$\rho_M (1 - \varepsilon) H u_{\Gamma} = \text{const} \quad (18.86)$$

или

$$(1 - \varepsilon) H = \text{const}. \quad (18.87)$$

При этом произведение в уравнении (18.84) также не изменяется. Не изменяются и безразмерные переменные k_n и k_{in} , т. е. сохраняется подобие распределения температур в слое. Следовательно, изменение плотности укладки влияет на теплообмен за счет изменения газопроницаемости слоя (скорости фильтрации).

Адекватность модели реальному процессу оценивается по близости расчетных и измеряемых температур отходящих газов на завершающих стадиях обжига. В процессе идентификации в модели изменяется порозность и связанные с ней коэффициенты сопротив-

ления слоя, а также соответственно скорости фильтрации таким образом, чтобы расчетные и измеряемые температуры газа на выходе из слоя совпадали.

Если зависимостью коэффициента термической массивности от скорости фильтрации пренебречь, то температура газа на выходе из слоя будет зависеть от комплекса wl . Пусть измеренная на расстоянии L_0 от входа окатышей в обжиговую машину температура газа равна t_0 , а расчетная – t . По условиям идентификации температура, измеренная на расстоянии L_0 , должна быть равна расчетной температуре на расстоянии L от входа окатышей в обжиговую машину. С учетом того, что при равенстве температур в слое на данной координате по высоте соблюдается условие:

$$w_0 L_0 = wl = \text{const}, \quad (18.88)$$

находится уточненное значение скорости фильтрации, которое необходимо заложить в расчет, чтобы добиться совпадения расчетных и измеренных температур, т. е.

$$w = w_0 L_0 / L. \quad (18.89)$$

Скорость фильтрации связана с величиной порозности слоя зависимостью

$$p_{\text{сл}} = \xi_c [(1 - \varepsilon) / \varepsilon^3] w^2, \quad (18.90)$$

где ξ_c – коэффициент сопротивления слоя; $p_{\text{сл}}$ – давление газов.

Приравняв выражения (18.90), записанные для реальных и расчетных условий, и подставив вместо величины w её значение по уравнению (18.89) с учетом упрощения, получили зависимость:

$$(1 - \varepsilon_0) / \varepsilon_0^3 = [(1 - \varepsilon) / \varepsilon^3] (L_0 / L)^2, \quad (18.91)$$

где ε и ε_0 – значение порозности, принятые в расчете и уточненные в результате идентификации, соответственно.

Из уравнения (18.91), таким образом, и находится уточненное значение порозности слоя – основного параметра идентификации. Блок-схема рассмотренного алгоритма идентификации приведена на рис. 18.14 (см. также рис. 18.15). С целью упрощения рабочей

программы зависимость $T_r = T_r(l)$ на участке L_0L рекомендовано принимать линейной. Производная $m' = dT_r / dl$ определяется по двум значениям температуры газа (T и T'), рассчитанным для двух соседних вакуум-камер. Уточненное значение порозности слоя определяется последовательным увеличением ε с шагом $\Delta\varepsilon = 0,003\text{--}0,01$ и сравнением величины $(1 - \varepsilon)/\varepsilon^3$ с уточненным значением $\beta = (1 - \varepsilon_0)/\varepsilon_0$. Идентификация математической модели предусматривалась при отклонении расчетной температуры газа от измеренной более чем на 25°C . При меньшем отклонении значение порозности принималось равным предыдущему. Расчетное значение порозности в процессе идентификации ограничивается реальными пределами:

$$0,2 < \varepsilon < 0,4. \quad (18.92)$$

Выход за реальные пределы порозности, как исключение, может проявиться вследствие случайных замеров величины температуры отходящих газов и др.

В качестве примера рассмотрен фрагмент работы алгоритма идентификации, построенного по описанному принципу и реализованного в составе программного обеспечения АСУ ТП процесса обжига окатышей.

Идентификацию проводили по температуре отходящих газов в зоне рекуперации. После первого расчета теплообмена расхождение между измеренной и расчетной температурами отходящих газов составляло 69°C ; причем расчетная температура была 554°C , а фактическая 623°C . Уже после первой корректировки величины порозности ($\varepsilon = 0,279$) расхождение между расчетной и измеренной температурами составило 6°C (измеренная 534°C , а расчетная 540°C). Поскольку температуры практически совпали, следующий расчет теплообмена и газодинамики проходил при том же значении порозности ($\varepsilon = 0,279$). Однако за время расчета (22 мин) изменились характеристики слоя и разность между расчетной и измеренной температурами составила 13°C (522 и 535°C соответственно), поэтому значение порозности было скорректировано ($\varepsilon = 0,270$). Таким образом, практически за 1–2 цикла расчетов удается осуществить адаптацию математической модели.

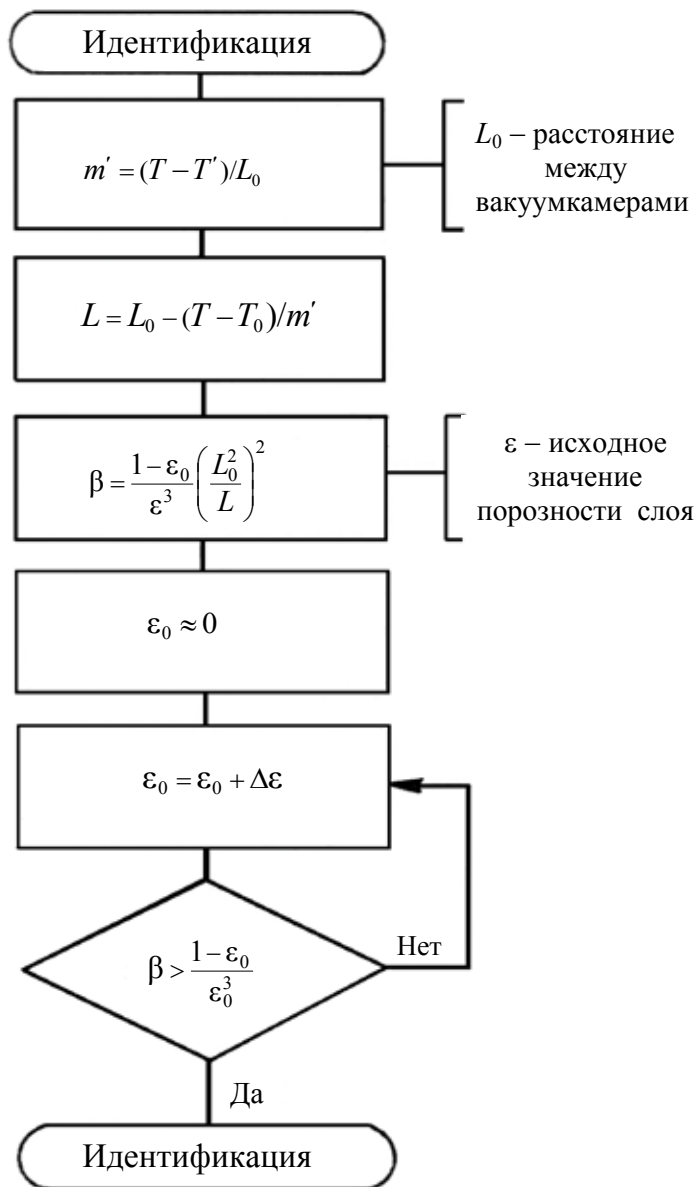


Рис. 18.14. Алгоритм идентификации математической модели для управления обжигом окатышей

Отметим, что с использованием реальных температур слоя окатышей проводилась с применением данных лабораторных исследований адаптация значений прочности окатышей в расчетных участках по длине и высоте слоя.

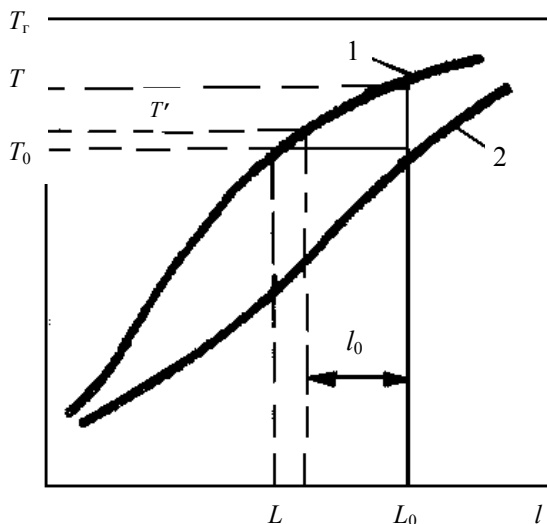


Рис. 18.15. Расчетные (1) и измеренные (2) температуры газа на выходе из слоя (к алгоритму идентификации) на машине ОК-306 Лебединского ГОКа

Как видим, использование детерминированной математической модели объекта с распределенными параметрами позволяет не только существенно упростить алгоритм идентификации модели, но и значительно увеличить быстродействие алгоритма. Адаптированное значение порозности слоя окатышей используется для корректирования аэродинамического сопротивления слоя – параметра, необходимого для управления процессом в составе АСУ ТП.

Как отмечалось, система автоматического управления обжигом окатышей (АСУ ТП) с использованием была математической детерминированной модели объекта с распределенными параметрами использована на Лебединском и Соколовско-Сарбайском ГОКах со значительным экономическим и экологическим эффектами (экономия удельного расхода теплоносителя – природного газа и электроэнергии, снижение выбросов в атмосферу).

18.4. Разработка и применение системы «Гранулометр» для контроля и автоматизации процесса окомкования и дробления рудных материалов

18.4.1. Определение грансостава сырых окатышей на обжиговых конвейерных машинах

В процессах упрочнения окатышей технологическая модернизация сочетается с модернизацией систем автоматики, однако ряд процессов оставались слабо автоматизированными. В частности, окомкование – процесс получения окатышей из поступающей шихты, при котором выходные величины (гранулометрический состав, прочность и пластичность окатышей) имеют сложные зависимости прежде всего от параметров сырья (физико-химические свойства шихты, влажность, насыпная масса и т. д.), и во вторую очередь от технологических параметров окомкователя (для чашевого окомкователя это скорость вращения, угол наклона, производительность по шихте). Предпринималось много попыток создания систем, базирующихся например на накопленных статистических данных (системы советчиков, нечеткой логики, эмпирические модели) или на теоретических основах (например, модельной теории Е.А. Исаева) [18.74–18.76]. Сложность создания таких систем объясняется отсутствием датчиков входных и выходных величин.

В этом плане создание датчика гранулометрического состава – полнофункционального датчика распределения окатышей по размерам и среднего диаметра представлялось весьма актуальной задачей. Конечно, значительную роль играет и создание и ввод в эксплуатацию надежных анализаторов качества входного сырья (влажности, насыпной массы, физико-химических свойств шихты).

Не потеряло актуальности предложение автора по созданию комплексного анализатора комкуемости сырья, основанного на измерении параметров физико-химических свойств шихты, например, сил сцепления частиц, сил трения, вязкости. Это позволит сформулировать более четко критерий управления и оптимизировать процесс окомкования по комкуемости, т. е. по скорости роста массы частиц.

При этом следует отметить достаточную продвинутость, в том числе на мировом уровне, теоретических аспектов, связанных с цифровой обработкой изображений [18.95; 18.96].

Разработанная измерительная система «Гранулометр» позволяет проводить в реальном времени бесконтактное измерение гранулометрического состава окатышей, движущихся на конвейере.

Конкретные заявленные параметры данной измерительной системы представлены в описании патентов [18.100–18.103].

Прежде всего, еще раз отметим, что для эффективного производства окатышей необходим автоматический контроль многих технологических параметров. Большинство из них, в том числе гранулометрический состав руды, шихты и сырых железорудных окатышей, в настоящее время определяется или весьма примитивными механическими приборами, точностные характеристики которых оставляют желать лучшего, или выполняемыми время от времени лабораторными анализами. Существующие способы оценки размеров кусковых материалов обладают достаточно высокой погрешностью (20–22 %), снижающей оптимальность управления процессом окомкования.

Методы определения геометрических размеров частиц различных материалов (окатышей, камней, зерен), как правило, связаны с устройствами, требующими непосредственного контакта с измеряемым материалом, что весьма трудоемко и неприемлемо в случае непрочных неметаллизированных окатышей. Разработанная система измерения размеров сырых окатышей основана на бесконтактном методе определения линейных размеров частиц [18.77–18.83].

Измеритель диаметров – гранулометр, представляет собой программный комплекс обработки телевизионных изображений, позволяющий определять размеры окомкованных материалов, имеющих форму, близкую к сферической. Гранулометр состоит из телевизионной камеры, источников освещения, устройства преобразования аналогового телевизионного кадра в цифровое изображение, а также программного комплекса обработки оцифрованного изображения, реализованного в реальном времени на ЭВМ. Работает система следующим образом. Телевизионная камера, оснащенная для бестеневой съемки не менее чем тремя источниками ИК-излучения, снимает изображение верхнего слоя окатышей с движущегося транспортера. Учитывая небольшую глубину слоя окатышей (5–6 см) и случайный угол скатывания сырых окатышей с турели окомкователя можно утверждать, что окатыши перемешаны равномерно и

изображение верхнего слоя адекватно отображает всю массу окатышей на транспортере. Применяются телекамеры на ПЗС-матрицах с электронными затворами, способные обеспечить малое время выдержки. Изображение передается в АЦП, где оно преобразуется в матрицу размером 512x512 элементов с квантованием на 256 уровнях серого. Полученная матрица обрабатывается методами цифровой обработки изображений. С целью повышения достоверности результатов измерения, в расчетах участвуют только полностью попавшие в кадр объекты, также проводится исключение посторонних предметов. Основные алгоритмические блоки системы: блок цифровой низкочастотной фильтрации, блок выделения областей изображения с максимальной яркостью, блок выделения изображений окатышей (сегментации), блок расчета радиусов окатышей, блок статистической обработки и построения гистограмм распределения количества окатышей по диаметрам, блок интерфейса пользователя и управления параметрами измерителя. Программный комплекс реализован на Delphi для Windows NT и работает в реальном времени.

Программный комплекс может обслуживать одновременно до 8 телекамер, обеспечивая независимое измерение грансостава 8 окомкователей с погрешностью измерений до 5 %.

Выходная информация гранулометра, гистограммы количественных распределений окатышей по диаметрам или по массе используются для управления барабанами окомкователей (частота вращения, угол наклона, влажность).

Остановимся более подробно на основных особенностях работы гранулометра.

Выделение контуров окатышей является одной из составных частей алгоритмического обеспечения, используемого в программно-аппаратном комплексе для измерения размеров окатышей на конвейере. Для определения размеров производится программная обработка оцифрованного телевизионного изображения окатышей на конвейере. Система работает в реальном времени, поэтому на алгоритмическое и программное обеспечение накладываются жесткие временные ограничения. Кроме того, изображение окатышей на конвейере отличается от типового, состоящего из объекта (объектов) и фона. Отличие заключается в отсутствии на изображении фоновой составляющей. Изображение окатышей представляет со-

бой совокупность тел, имеющих близкую к сферической форму и высокую плотность упаковки.

Существует множество стандартных методов выполнения сегментации. Однако не все они применимы к рассматриваемому изображению. Многие известные алгоритмы реализуют стратегию объединения точек изображения по признаку однородности свойств функции яркости. Сюда относятся методы пороговой обработки, основанные на анализе различных характеристик гистограммы распределения значений яркости и отличающиеся минимальными вычислительными затратами. В нашем случае, учитывая характерную гистограмму изображения окатышей на конвейере, а она унимодальна, невозможно выбрать порог непосредственно по гистограмме.

Одномерное сечение функции яркости представляет собой монотонно изменяющуюся функцию. Таким образом, чтобы отделить один окатыш от другого необходимо выделить участки возрастания и убывания функции яркости, представляющие собой противоположные стороны окатыша.

Наиболее употребимым в данной ситуации способом является применение алгоритмов, использующих операцию дифференцирования. С этой целью были рассмотрены градиентные методы и метод анализа высших производных функции яркости. Последний использует, как правило, оператор Лапласа. Однако лапласиан чувствителен к шуму и инвариантен к направлению перепада, поэтому результат обработки изображения оператором Лапласа оказался неудовлетворительным. Применение известных градиентных методов Собеля, Робертса и Превитта дало лучшие результаты. Сравнительный анализ этих алгоритмов показал, что результат их работы примерно одинаков. Для максимальной производительности алгоритма и снижения влияния шума был выбран масочный 3×3 оператор Превитта. В данном случае для выделения границ окатыша градиентный оператор применялся дважды. Первый раз изображение обрабатывается по восьми направлениям. Использование градиентного оператора по каждому направлению, при котором учитываются все положительные отклики маски, позволяет получить бинарное изображение. Выделенные участки изображения являются областями монотонного изменения функции яркости в соответствующем направлении и представляют собой стороны окатышей. Получивше-

еся бинарное изображение подвергается медианной фильтрации для снижения шумовой составляющей исходного изображения. Для окончательного построения контурного изображения снова используется градиентный оператор Превитта. Полученный контурный препарат далее используется для определения размеров посредством простого алгоритма корреляции выделенных окатышей с окружностями различных диаметров.

В ходе обработки изображения в распределении интенсивности отраженного излучения определяются максимумы и минимумы интенсивности, а также их расстояние друг от друга предпочтительно от восьми до шестнадцати направлений. Расстояние между максимумами и минимумами интенсивности является при этом величиной, которая особенно пригодна для представления геометрических размеров частиц окомкованного и/или гранулированного материала. Оказалось особенно предпочтительным определять расстояние между максимумами и минимумами интенсивности от восьми до шестнадцати направлений, причем все направления расположены относительно друг друга под одинаковым углом. При этом количество от восьми до шестнадцати направлений оказалось особенно подходящим компромиссом между требованием измерения в малом количестве направлений, чтобы уменьшить до минимума вычислительные расходы, и требованием измерения в возможно большем количестве направлений, чтобы получить возможно более точное изображение частиц.

В частности, при приблизительно шаровой форме частиц повышение качества направлений, в которых определяют расстояние между максимумами и минимумами интенсивности, не приводит к заметному улучшению точности при определении геометрических размеров частиц.

Система позволяет обрабатывать до восьми точек измерения. Принцип работы гранулометра – оптический. Над конвейером окатышей устанавливается видеокамера и система ИК-прожекторов для обеспечения постоянной подсветки кадра (см. рис. 18.16–18.26). Оцифрованный сигнал передается для последующей обработки в специализированный компьютер. Несмотря на большой объем вычислений, связанных с цифровой обработкой сигнала, удастся получить достаточно высокое быстродействие. Основные технические характеристики гранулометра приведены в табл. 18.3.

Алгоритм расчета гранулометрического состава заключается в следующем (см. рис. 18.16).

Первоначально в полученном кадре изображения специальными алгоритмами производится подавление посторонних помех и выделение контуров окатышей. Из дальнейшего рассмотрения исключаются окатыши, точное распознавание формы которых невозможно (ввиду сильного закрытия соседними окатышами). Далее для каждого окатыша находится эквивалентный диаметр, равный минимальному вписываемому диаметру, измеряемый первоначально в пикселях. Камера, установленная на расстоянии порядка 400 мм от конвейера, позволяет получить соотношение около 4 пикселей/мм. Таким образом, потенциальная ошибка определения размера идеального сферического окатыша составляет менее 1-го пикселя, т. е. меньше 0,25 мм (по диаметру). Согласно измеренному диаметру увеличивается число штук окатышей заданного класса. Изначально программное обеспечение гранулометра рассчитано на классы «шириной» 1 мм, например класс 5–6 мм, 6–7 мм и т. д.

Таблица 18.3
Основные характеристики измерительной системы «Гранулометр»

Параметр	Значение	Единица измерений
Диапазон измеряемых диаметров окатышей	5–25	мм
Минимальная ширина класса (по диаметру)	1	мм
Потенциальная точность измерения диаметра (лабораторные окатыши)	$\frac{1}{2} - 1$ 0,25	Пиксель мм
Количество кадров усреднения	8	шт
Количество каналов измерения	до 8	шт
Время измерения одного канала (8 кадров)	40–70	с
Окно визирования	130·130	мм
Разрешение изображения	4	Пиксель/мм
Относительная погрешность определения массового грансостава (сравнение с ситовым методом)	< 10	%
Используемый компьютер Pentium MMX 233 МГц		

Вычисляется не только штучное распределение, т. е. число окатышей, попавшее в заданный интервал по диаметру, но и массовое распределение, определяемое, как масса окатышей, имеющих размеры заданного интервала. Массовое распределение вычисляется исходя из условия одинаковой кажущейся плотности окатышей разного размера, или точнее вычисляется объемный гранулометрический состав. Ошибка определения массового гранулометрического состава также мала ввиду того, что объем каждого класса определяется не пересчетом штучного грансостава в массовый, используя значение середины расчетного интервала, а непосредственным суммированием объемов каждого измеренного окатыша.

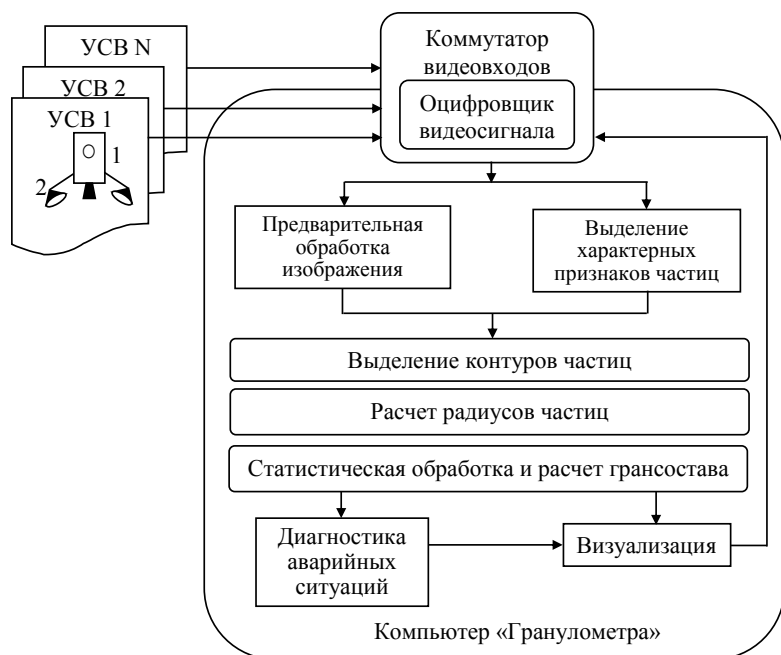


Рис. 18.16. Блок-схема работы алгоритма «Гранулометра»:

1 – видеокамера; 2 – ИК-проекторы

Выдача информации проводится после обработки и усреднения информации по 8 обрабатываемым кадрам. Число требуемых кадров для усреднения настраивается при монтаже системы исходя из стабильности грансостава в точке измерения, требуемого времени

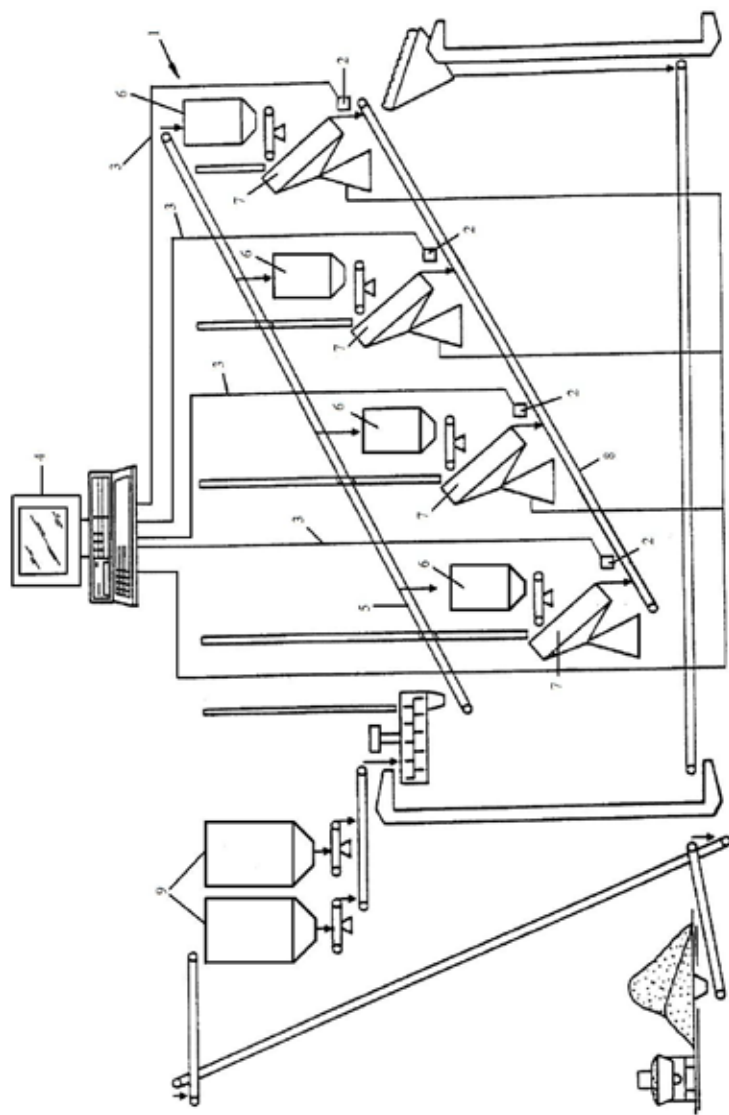


Рис. 18.17. Установка «Гранулометр» на транспортере участка для получения окатышей из железной руды:

1 – участок получения окатышей; 2 – измерительные блоки с видеокамерой и источниками излучения; 3 – линия данных; 4 – регистрирующий и управляющий компьютер; 5 – принимающий ленточный транспортер концентрата; 6 – бункера накопителя материала; 7 – тарельчатый окомкователь; 8 – ленточный транспортер сырых окатышей; 9 – бункера с исходным концентратом

выдачи информации, числа каналов измерения. За усредняемое число кадров программа успевает «обмерить» 100–110 окатышей. При увеличении производительности компьютера или уменьшения числа каналов количество усредняемых кадров можно увеличить.

Обработка всех кадров и каналов проводится последовательно. После съемки кадра изображения (время съемки $1/20\,000$ с) конвейера с окатышами он обрабатывается, далее снимается следующий кадр. После усреднения 8 кадров изображений первого канала начинается обработка второго канала и т. д. Программное обеспечение позволяет настраивать число кадров в измерении, настраивать порядок опроса каналов. Выдача информации в информационную сеть предприятия происходит по запросам ОРС-сервера.

Проблеме обеспечения повышенной точности уделялось особое внимание. Трудность задачи вызвана не только сложными условиями работы и большим объемом вычислений, но и характеристиками объекта измерений – окатыша.

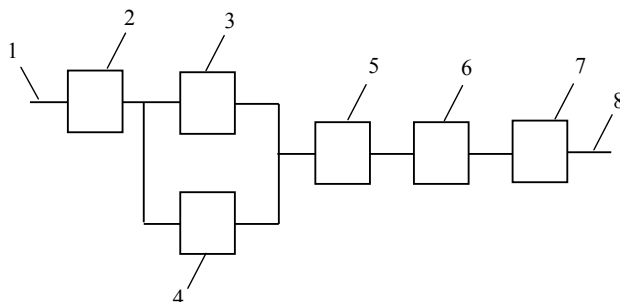


Рис. 18.18. Схема последовательности обработки видеоизображения:

1 – изображение на видеокамере; 2 – цифровой преобразователь; 3 – фильтр нижних частот; 4 – устройство обнаружения максимального значения интенсивности; 5 – градиентный усилитель; 6 – блок вычисления размеров окатышей; 7 – статистический модуль для оценки распределения окатышей по размерам; 8 – выходные данные размеров окатышей и их статистического распределения

При этом учитывались основные причины возможного снижения точности измерений.

1. Неидеальность формы окатышей. Технологи оперируют показателем «коэффициент формы окатышей», выражаемый как отношение осей эллипсоида, представляющих окатыш.

2. Присутствие наряду с окатышами посторонних предметов. При окомковании часть гарнисажа разрушается донными и боковыми ножами и куски гарнисажа неправильной формы, попадая в кадр, искажают измерение. Доля такого «крупняка», тем не менее, характеризует окомкователь с точки зрения качества.

3. Окатыши разного размера имеют разную кажущуюся плотность. Учет возможен после проведения достоверных исследований такой зависимости.

4. Возможно, что при переходных процессах сегрегация более выражена и верхний слой не совсем адекватно представляет весь слой. В таких случаях следует получать информацию о свойствах окатышей от других датчиков.

5. Согласно требованиям ГОСТ по отбору проб окатышей масса окатышей в пробе должна равняться 7–10 кг. Если считать, что среднемассовый диаметр равен 13 мм, а вес «среднего» окатыша класса 12–14 мм – 4,5 г, то в 7 кг будет около 1560 окатышей. Таким образом, для выполнения требований ГОСТ число кадров для оцифровки должно составлять более 100. Для правильного сравнения с существующими методами оценки грансостава требуется специальная настройка системы.

Формально тем не менее можно считать, что гранулометр, как средство измерения, имеет все же более высокий класс точности, нежели набор некалиброванных лабораторных сит, рассевки проб на которых носят, строго говоря, субъективный характер.

Выдаваемая гранулометром информация может быть гибко настроена по требованию технологов (см. рис. 18.16). Так, для принятия решений по управлению окомкованием, система выдает информацию о массовом гранулометрическом составе по классам 5–10, 10–14, 16–18, > 18 мм, текущем среднемассовом диаметре. Применение современных вычислительных средств и гибкого программного обеспечения позволяет не только производить непосредственно измерение грансостава, но также и реализовать ряд сервисных функций. Это разнообразные вычисления параметров грансостава (среднемассовые диаметры, доли годного, мелочи и т. д.), контроль и самодиагностика функционирования измерительного датчика и окомкователя (отсутствие сигнала, уровень контрастности, корректность измерений, останов конвейера, посторонние предметы на конвейере), статистика работы агрегата за длительный период вре-

мени (просмотр и сортировка архива измерений, составление сводок и отчетов).

Еще одной полезной функцией является возможность осуществления видеоконтроля с возможностями стоп-кадра, при этом на экране показывается в реальном времени изображение окатышей на конвейере. Опытные окомковательщики и работники лаборатории могут визуально оценить качество окатышей (повышенную влажность поверхности, трещинообразование, правильность формы и т. д.). Наряду с показаниями текущего грансостава это позволяет оперативно вносить коррективы в режим окомкования.

К недостаткам системы можно отнести неопределенность времени обработки одного кадра. Оно определяется составом картинки, точнее гранулометрическим составом, попавшим в кадр. В условиях промышленной автоматики удобнее иметь фиксированное синхронизированное время обработки. Также ранее высказывались опасения о неадекватности представления всего объема окатышей верхним слоем, но как показывают испытания, при засыпке окатышей в слой на конвейере, происходит значительное перемешивание, поэтому сегрегация отсутствует.

Система «Гранулометр» прошла промышленные испытания на Качканарском ГОКе в 1999 г. и была подготовлена к промышленной эксплуатации на Лебединском ГОКе уже в 2002 г. По результатам контрольных замеров относительная погрешность определения грансостава не превышает 7 %. При оценке грансостава лабораторных окатышей точность значительно выше. Это объясняется, прежде всего, трудностью адекватного отбора проб в условиях работающего производства.

Работы по совершенствованию конструкции и повышения точности измерений продолжались. В частности, используется более совершенная видеокамера, новая система подсветки высокой яркости и контрастности, компьютер значительно более высокой производительности, оптимизированное программное обеспечение. Ориентировочно новая система позволит производить измерение одного канала менее, чем за 1 с. Это позволяет увеличить число обрабатываемых одним компьютером точек измерения до 16–32.

Дополнительно разработанная программа позволила исследовать колебания гранулометрического состава во времени. В условиях обжиговой машины Лебединского ГОКа был исследован грансостав

чашевого окомкователя. Последовательно во времени записывали изображение с видеокамеры гранулометра с частотой около 3 кадров в секунду. При такой съемке обработке подвергается около половины всех видимых окатышей верха слоя (полностью отследить слой окатышей, сходящих с чашевого окомкователя можно при частоте съемки 6, 8 кадров/с). На рис. 18.20 приведен пример обработки одного из измерений, где показана зависимость среднемассового диаметра от времени. Видно, что в установившемся режиме амплитуда колебаний усредненного среднемассового диаметра не превышает 0,5 мм (или 4,17 % отн.). Это подтверждает правильность выбора алгоритма последовательного расчета каждого кадра. Такие точные временные измерения позволят в дальнейшем исследовать переходные процессы в окомковании с точки зрения грансостава, а также в разработке теории окомкования. Продолжаются работы по определению одновременно с грансоставом влажности окатышей, оценки степени трещинообразования и правильности формы окатышей.

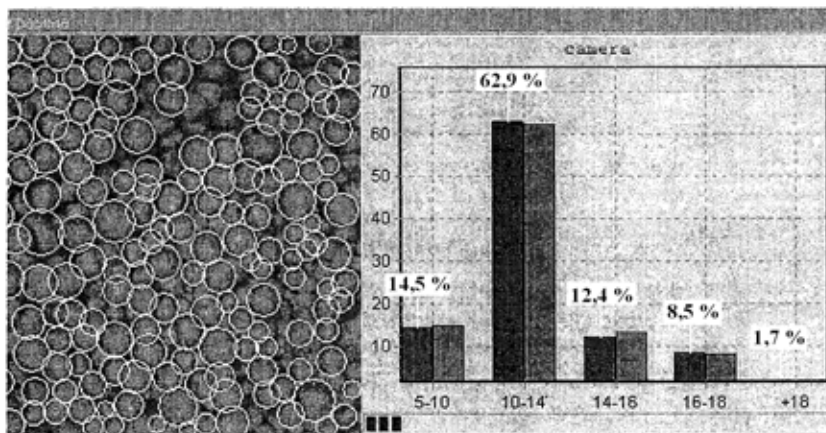


Рис. 18.19. Пример отображения данных измерений гранулометра

Таким образом, система бесконтактного измерения гранулометрического состава является перспективной оперативной системой контроля качества окатышей, открывающая большие возможности по созданию интеллектуальной автоматизированной системы производства сырых окатышей. При этом гранулометр может быть

использован для проведения высокоточных измерений быстротекущих процессов, а также в качестве точного лабораторного измерителя гранулометрического состава сырых окатышей.

Гранулометр данной конструкции внедрен на Лебединском и Михайловском ГОКах. Отметим, что в 2011 г. ряд работников был удостоен премии Правительства РФ за разработку и реализацию на Михайловском ГОКе высокотехнологичного крупномасштабного производства в Российской Федерации, за внедрение современных инновационных технологий полномасштабный процесс производства железорудной продукции, от добычи руды до её переработки. В число инновационных проектов, успешно внедренных на этом ГОКе и отмеченных как уникальные и высокоэффективные, включена и «не имеющая аналогов», описанная выше компьютерная система «Гранулометр».

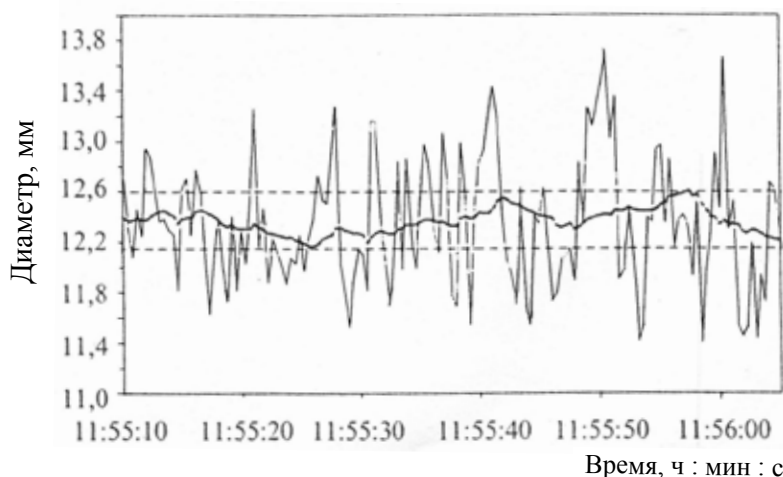


Рис. 18.20. Изменение среднemasового диаметра окатышей во времени, жирная кривая — усреднение

18.4.2. Математическое описание грансостава и производительность гранулятора

Целью данной работы была разработка способа математического описания, т. е. функции распределения грансостава окатышей, и попытка установления взаимосвязей ее параметров с технологи-

ческими параметрами работы окомкователя [18.90]. Этим вопросам уделено недостаточное внимание в литературе.

Для подбора приемлемого математического описания грансостава была создана программа аппроксимации экспериментальных данных. Наиболее точно описать грансостав проб сырых окатышей, отобранных на Лебединском ГОКе (ЛебГОК) в период 1999–2001 гг., удалось при использовании β - и общего γ -распределения. У γ -функции не наблюдалась стабильность параметров, что приводит к менее точному описанию мелких классов. Отобранные пробы наилучшим образом описывались β -распределением [18.115]. При аппроксимации внимание уделялось прежде всего соответствию мелких и средних классов, крупные классы легко описываются другими способами. Аппроксимация четырех грансоставов γ -функции представлена на рис. 18.21. Видно, что общая форма соответствует экспериментальной форме грансостава окатышей. Приведенные графики показывают суммарную массовую долю окатышей размером меньше заданного диаметра (интегральный грансостав). Используемое для аппроксимации распределение выражается через γ -функцию Γ :

$$\gamma(d) = \Gamma(p+q)/[\Gamma(p)\Gamma(q)]d^{p-1}(1-d)^{q-1}, \quad (18.93)$$

где d – нормированный диаметр; p и q – параметры.

Подбор β -распределения не представляется сложным. Эта функция вычисляется даже в Excel, не говоря о специализированных программах, например, Mathcad или Matlab, позволяющих автоматически достаточно точно подбирать коэффициенты. Указанная зависимость вычисляется для нормированного диаметра, т. е. его значение находится в диапазоне от 0 до 1. Иначе обстоит дело с β -распределением второго рода — оно вычисляется для любого диаметра от 0 до ∞ . Однако подобрать его параметры для аппроксимации грансостава с приемлемой точностью пока не удалось.

β -функция показала наилучшую точность не только при описании проб, отобранных на ЛебГОКе (рис. 18.21), но и для ряда других данных. Формально ее параметрами могут оказаться некие физические величины, характеризующие комкуемость шихты в данных условиях, однако главная задача подбора параметров распределения окатышей по размерам, как уже отмечалось, - это поиск зависимо-

сти их от параметров работы окомкователя и физико-химических свойств шихты.

К характеристикам грансостава относится среднемассовый диаметр.

В то же время характеристикой функции распределения является положение ее максимума, т. е. размер окатыша, при котором она максимальна. При обработке различных распределений была отмечена близость значения среднемассового диаметра и значения, соответствующего максимуму функции распределения.

Положение максимума, обозначаемое dm (см. рис. 18.22), определяется через параметры β -распределения p и q следующим образом:

$$dm = D_{\max} (p - 1) / (p + q - 2), \quad (18.94)$$

где D_{\max} — максимальный диаметр получаемых окатышей. Если известен диаметр, соответствующий максимуму функции, можно рассчитать параметры распределения.

Все это позволяет составить модель гранулятора, с помощью которой по заданным значениям технологических параметров (частота вращения, производительность, угол наклона) можно рассчитать получаемый грансоста и любые его характеристики на основе экспериментальных грансоставов.

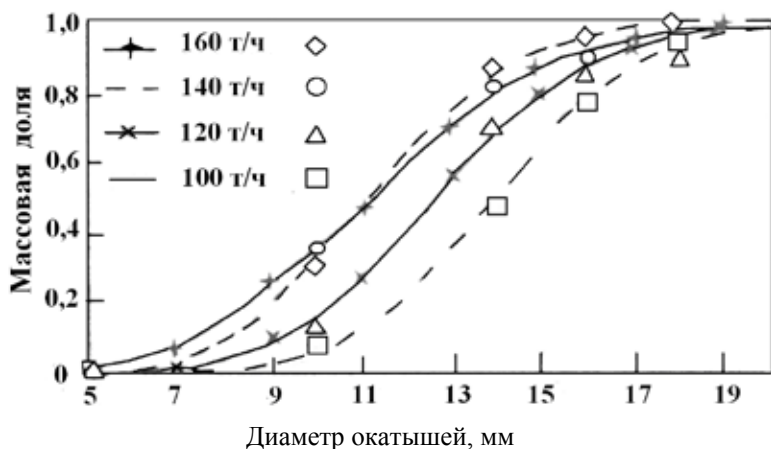


Рис. 18.21. Аппроксимация интегрального грансостава интегральной функцией β -распределения (линии — аппроксимация; точки — экспериментальные данные)

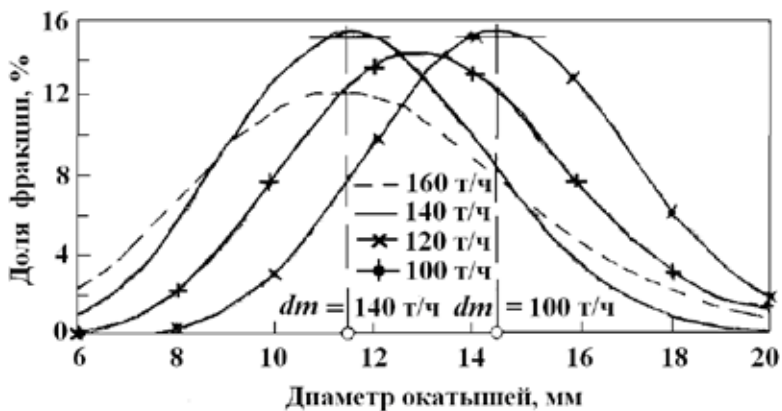


Рис. 18.22. Определение параметра «диаметр основного класса» на основе функции плотности распределения окатышей по диаметрам

Методика составления модели состоит в следующем:

- определяют параметры β -распределения, описывающего грансостав каждой пробы (в данном примере – четыре пробы, отобранные при разной производительности чашевого окомкователя);
- описывают зависимость среднемассового диаметра от технологического параметра (в настоящем примере — от производительности чаши);
- подбирают зависимость одного из параметров распределения от технологического параметра гранулятора (от производительности);
- установив зависимость диаметра, соответствующего максимуму функции грансостава, и одного из параметров от технологического параметра, например от производительности, можно выразить оставшийся параметр β -функции и построить гранулометрическую модель окомкователя.

На рис. 18.23 зависимость положения максимума функции грансостава от производительности $dm(G)$ представлена полиномом второго порядка. Подбор осуществлялся офисной программой Microsoft Excel. Аналогично полиномом второго порядка была представлена зависимость параметра $p(G)$ от производительности G . Согласно описанной методике построены зависимости грансостава от производительности для чашевого окомкователя. Показано изменение грансостава при изменении производительности по ших-

те от 100 до 160 т/ч с шагом 10 т/ч (рис. 18.24). Можно моделировать любые характеристики грансостава, такие как разные средние диаметры, отношения долей мелких и средних классов и т. д. В частности, на рис. 18.25 приведен результат моделирования выхода класса 10–14 мм в зависимости от производительности. Сорамерность расчетных и экспериментальных данных подтверждает правильность выбранных модельных представлений и позволяет предположить, что при большем числе замеров удастся повысить точность аппроксимации. Заметим, что критерием соответствия при этом было общее соответствие грансостава по всем классам окатышей. При моделировании по критерию максимального соответствия доли годного класса характер зависимости, приведенной на рис. 18.25, в значительно большей степени отвечает экспериментальным данным. Полученные результаты можно рассматривать как предварительные, но даже на этом этапе можно определить оптимальную нагрузку на окомкователь с целью увеличения выхода годного класса.

Анализ приведенных зависимостей (см. рис. 18.23) показывает, что окатыши с максимальным среднемассовым диаметром получают при минимальной производительности (100 т/ч). При возрастании ее выше 100 т/ч диаметр уменьшается (примерно 30 % уменьшения диаметра при росте производительности на 40 %), причем с увеличением производительности грансостав «расширяется», т. е. становится более размытым (см. рис. 18.22 и 18.24). С точки зрения получения наибольшего среднемассового диаметра следует поддерживать производительность гранулятора на уровне 100 т/ч, а для обеспечения максимального выхода фракции 10–14 мм – около 120 т/ч (см. рис. 18.25).

Для составления точной модели, учитывающей другие технологические параметры гранулятора и физико-химические свойства шихты, требуется более полная статистическая выборка, в частности по офлюсованным и неофлюсованным окатышам, что будет предметом дальнейших исследований.

Таким образом, установлено, что β -функция позволяет описать распределение масс окатышей по диаметру(грансостав) с большой точностью. Проведена адаптация расчетных параметров распределения грансостава с экспериментальными данными и предложена модель определения грансостава окатышей в зависимости от производительности окомкователя.

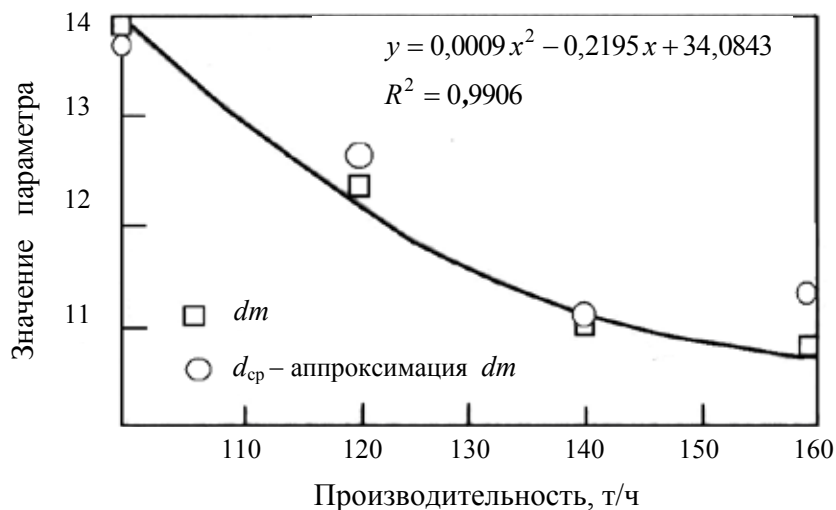


Рис. 18.23. Описание зависимости диаметра основного класса dm от производительности полиномом второй степени (d_{cp} — среднемассовый диаметр)

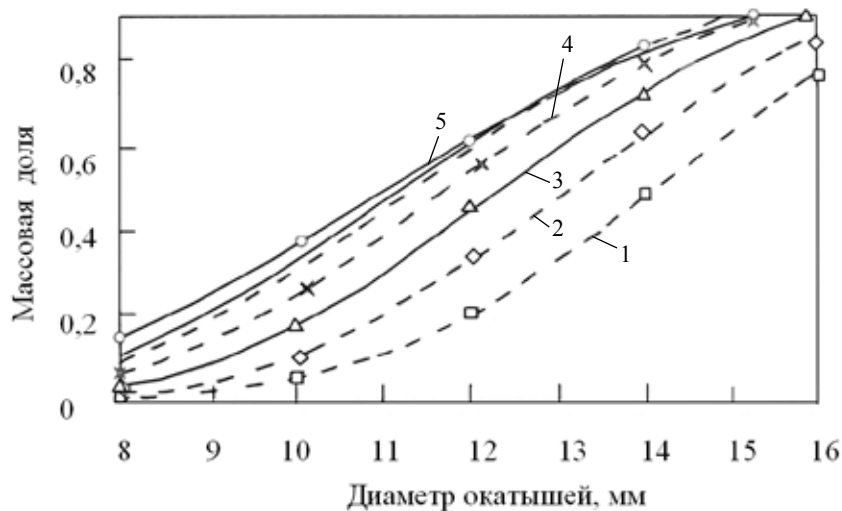


Рис. 18.24. Результаты расчетов по гранулометрической модели чашевого окомкователя:
 производительность, т/ч: 1 – 100; 2 – 110; 3 – 120; 4 – 130; 5 – 150-160

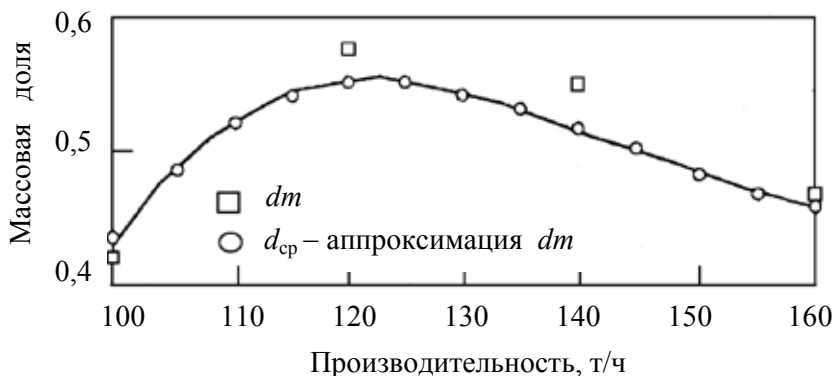


Рис. 18.25. Результаты моделирования (о) доли выхода годного класса в зависимости от нагрузки по шихте и экспериментальные данные (□)

В условиях Лебединского ГОКа на чашевом окомкователе оптимальная с точки зрения максимального выхода годного производительность составляет 120 т/ч.

18.4.3. Постановка и реализация системы автоматического управления размером окатышей

САУ управления размером окатышей с использованием системы «Гранулометр» отрабатывалась в совместных работах НПВП «ТОРЭКС» и УрФУ, инициатором этой работы и постановка задачи формировалась Г.М. Майзелем с участием В. Г. Лисиенко. В реализации проекта активное участие принимала на Лебединском ГОКе фирма НПВП «ТОРЭКС» и, в частности, аспирант А.В. Стародумов [18.82–18.89].

Еще раз отметим, что опыт эксплуатации как относительно новых обжиговых машин, так и после реконструкции с использованием ряда технических решений и элементов разрабатываемых тепловых схем показывает, что один из основных резервов повышения их технико-экономических показателей – это улучшение качества (и его стабильность) сырых окатышей. Вопросам улучшения качества окатышей уделяется достаточное внимание, однако колебания влаги и дозировки бентонита в шихте, крупности концентрата и содержания в нем пустой породы, свойственные практически всем фабрикам окомкования России и СНГ, требуют дополнительных усилий по решению этой проблемы.

Эти колебания исключают возможность формирования стабильного по структуре и газодинамическим характеристикам слоя сырых окатышей на обжиговой машине. Отрицательные последствия влияния этого фактора на работу последующей технологической цепи, а также на качество обожженных окатышей не вызывает сомнений.

Для реализации постоянного по всем параметрам слоя сырых окатышей необходима разработка комплексной автоматизации с обратной связью всего комплекса участков окомкования — обжиговая машина. Такая система требует создания технологических алгоритмов управления окомкователями, т. е. математической модели, увязывающей параметры их работы со свойствами сырых окатышей, в частности их гранулометрическим составом.

В этой связи разработанная измерительная телеметрическая система «Гранулометр» для бесконтактного определения гранулометрического состава сырых окатышей, основанная на компьютерной обработке видеоизображения потока окатышей в режиме реального времени, создает предпосылки создания современной АСУ ТП окомкования.

Система автоматического управления получения сырых окатышей

Для ведения эффективного производства железорудных окатышей необходимо обеспечить на финальной стадии их обжига хорошую газопроницаемость, прочность сырых окатышей на раздавливание, однородность гранулометрического состава.

Необходимость разработки автоматической системы управления грансоставом окомкователя очевидна — гранулометрический состав и прочностные параметры сырых окатышей нестабильны, интенсивность роста гранул и производительность окомкователей колеблются в широких пределах в зависимости от химического состава концентрата, качества перемешивания компонентов шихты, постоянно изменяющейся влажности исходных компонентов, что приводит к изменению газопроницаемых и подаваемых на обжиг окатышей, а значит и к перерасходу энергоносителей. Наименее изученным остается механизм получения окатышей в барабанном

окомкователе ввиду присутствия обратной связи по отбракованному в грохоте возрасту сырых окатышей.

Проблема автоматизированного управления сырым окомкованием долгое время была неразрешимой из-за отсутствия надежного, работающего в непрерывном режиме бесконтактного датчика гранулометрического состава и свойств сырых окатышей. Разработанная система «Гранулометр», первоначально проверенная на Качканарском ГОКе, претерпела по результатам длительных промышленных испытаний на Лебединском, Михайловском и Костомукшском ГОКах ряд усовершенствований, позволивших создать достаточно надежный бесконтактный датчик крупности окатышей, ориентированный на применение в условиях фабрик окомкования.

Как отмечалось, принцип определения размеров окатышей – оптический.

В датчике установлена специализированная видеокамера с системой яркостной подсветки. Изображение верхнего слоя окатышей передается в вычислительный компьютер системы «Индикатор крупности», где средствами цифровой обработки изображений выделяется контур каждого окатыша.

По результатам измерения его диаметра на изображении строится функция распределения по размеру.

К особенностям алгоритма распознавания изображений, реализованного в этой системе относятся:

- бесфоновое распознавание объектов и их классификация;
- пространственное разделение объектов по степени их видимости в кадре, весовой учет полностью видимых и частично скрытых объектов;
- учет фактора формы и площадных форм частиц;
- учет качества состояния поверхности.

Зачастую бесконтактное наблюдение не позволяет охватить весь поток материала, так как в обработку поступает информация только о поверхностном слое материала (1–3 диаметра окатышей). Кроме того, область определения размеров ограничена необходимой точностью, а также физическим разрешением камеры и составляет примерно 0,2 м. Поэтому для корректной работы датчика необходимо тщательно выбирать точку его установки. При отсутствии пространственной сегрегации окатышей по размеру верх слоя досто-

верно представляет собой всю пробу, однако таких точек на трактах транспортировки сырых окатышей нет — каждая перегрузка усиливает сегрегацию. Опытным путем по результатам длительных промышленных испытаний на окомковательной фабрике Лебединского ГОКа (ЛебГОКа) были определены оптимальные точки, дающие возможность охватить практически весь поток окатышей. Для чашевых окомкователей оптимальной стала точка непосредственно внутри работающего устройства, над дном чаши, позволяющая повысить точность и стабильность измерений.

Телевизионная компьютерная система измерения крупности и свойств сырых окатышей ТВКС «Индикатор крупности» стала основой автоматизированной системы управления процессами сырого окомкования в разработке НПП «ТОРЭКС» и УГТУ-УПИ (УрФУ), введенной в эксплуатацию на Лебединском ГОКе. Опираясь на показания датчиков грансостав, система управляет режимом работы отделения окомкования (шесть чашевых окомкователей) ОМ-2, обеспечивает стабильный грануло-метрический состав окатышей, производимых каждой ниткой окомкования, и поддерживает заданную суммарную производительность отделения окомкования по сырым окатышам.

Схема системы управления приведена на рис. 18.26. Измерительная часть ее состоит из ТВКС «Индикатор крупности» на шесть точек контроля грансостава. Выдача информации происходит с частотой не менее одного раза в минуту при расчете на обрабатывающем компьютере четырех точек измерения, причем корректировка параметров работы окомкователей системой осуществляется не чаще одного раза в 3–5 мин. ТВКС «Индикатор крупности» реализуется на двух рабочих станциях (РС «Гранулометр 1» и РС «Гранулометр 2»), результаты измерений (гранулометрический состав и свойства поверхности окатышей, аварийные сообщения) ежеминутно передаются в общую информационную сеть.

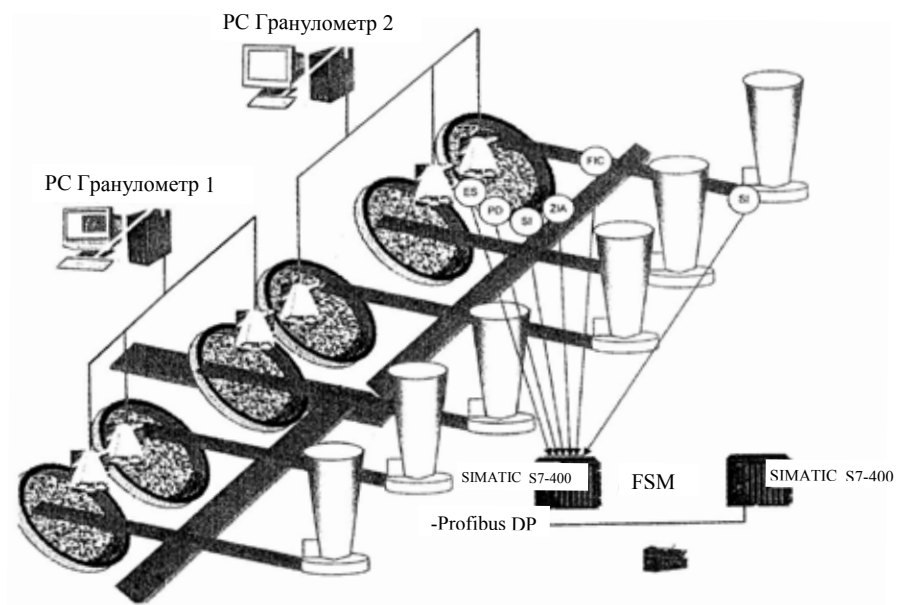
Для учета индивидуальных характеристик окомковательных чаш в системе заданы различные диапазоны производительности по шихте для каждого окомкователя, интервалы времени выдачи управляющих воздействий, коэффициенты чувствительности по углу наклона, скорости вращения, влажности.

Дальнейшим развитием системы, ориентированной на управление гранулометрическим составом сырых окатышей для чашевых окомкователей, стала система контроля грансостава и качества окатышей, получаемых в барабанных окомкователях с индивидуальными грохотами. АСУ сырого окомкования для обоих видов окомкователей существенно отличаются технологическими принципами регулирования. Чашевые окомкователи, как более гибкие объекты управления, позволяют оперативно реагировать на изменение свойств шихты, особенно влажности. Причем ее изменение немедленно сказывается на крупности годных окатышей. Поэтому для чашевых окомкователей реализуется прямое регулирование диаметра окатышей путем воздействия на скорость вращения, угол наклона, производительность. Для барабанных окомкователей (согласно исследованиям на ГОКах Михайловском и «Карельский окатыш») основными рычагами воздействия на режим окомкования являются расход бентонита и производительность.

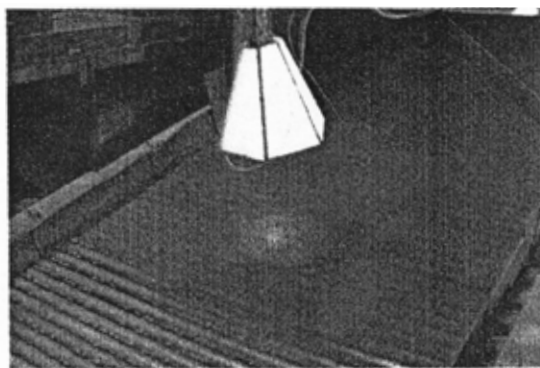
Принципы применения оптических гранулометров для измерения гранулометрических характеристик окатышей и особенно для управления чашевыми и барабанными окомкователями существенно различаются, так же как и точность измерения. Диапазон изменения среднего диаметра в зависимости от режима окомкования на чашевом окомкователе составляет ± 4 мм от номинального значения, а на барабанном – не более ± 1 мм.

Основная задача роликового грохота барабанного окомкователя – стабилизация грансостава годных сырых окатышей. Поэтому для управления системой «барабан–грохот» нужно знать не только общие гранулометрические характеристики, мало изменяющиеся в барабанном окомкователе, но и взаимосвязи количества классов разной крупности с процессами окомкования и комкуемости шихты.

Испытания на Костомукшском ГОКе показали, что значимой характеристикой для управления режимом окомкования является доля крупного класса, образуемого в барабанном окомкователе. Она более других параметров процесса связана с влажностью шихты и количеством связующих и флюсующих добавок. Поэтому для ее определения наряду с измерением размера годных окатышей видео-датчик расположили над роликовым грохотом.



a



б

Рис. 18.26. Структура схемы автоматизации сырого окомкования (ЛГОК) (а) и установка видеодатчиков при контроле грансостава и качества окатышей для барабанных окомкователей (б)

Это потребовало усложнения и ужесточения требований технологическому алгоритму измерения грансостава окатышей. В частности, для повышения точности измерений в расчеты по алгоритму введен учет высоты расположения окатышей (на верхушке ролика или щели между роликками), увеличено число итерационных проходов для четкого выделения поверхности роликов на изображении.

Результаты испытания показали, что основное возмущающее воздействие с точки зрения процесса окомкования — непостоянство свойств шихты. Для оценки ее комкующих свойств разработан алгоритм анализа состояния поверхности сырых окатышей, названный индексом шероховатости. Эксперименты подтвердили взаимосвязь свойств поверхности (шероховатости) сырых окатышей с влажностью и прочностными характеристиками. На основании таких зависимостей был разработан и опробован алгоритм управления процессами окомкования в барабанных окомкователях, позволяющий стабилизировать свойства и долю годных окатышей путем оптимизации содержания бентонита в шихте, а также управления нагрузкой.

Также опробованы способы уменьшения доли крупного класса и стабилизации свойств окатышей при повышенной влажности. Система оптимизации режима окомкования в барабанных окомкователях, стабилизирующая прочностные свойства окатышей, была запланирована к установке на обжиговой машине Михайловского ГОКа (МихГОКа).

Таким образом, в реализованном в настоящее время гранулометре фракционный состав экспонируемого слоя окомкованных материалов определяется на основе текстурного или яркостного анализа их видео-изображения, получаемого при помощи телевизионной камеры, расположенной над турелью окомкователя. Оцифровка изображения позволила использовать для измерения частиц методы цифровой обработки изображений, которые реализованы в виде программ, функционирующих на персональном компьютере в реальном времени. Среднее время запаздывания чашевого окомкователя составляет примерно 15–20 с. Время обработки видео-изображения окатышей составляет порядка 8–10 с, точность измерений не хуже 5 %, что и позволяет создать систему управления процессом окомкования.

Кроме того, необходимыми элементами в системе управления окомкованием являются: измеритель влажности компонентов и шихты, автоматические системы дозирования сыпучих материалов и

воды, центральный управляющий компьютер и интерфейс управления приводом тарельчатого окомкователя (частотой вращения и углом наклона). На основании информации о размерах шихты, предыстории процесса окомкования непрерывно ведется управление режимом работы окомкователя. Модель процесса окомкования корректируется по данным лабораторных исследований и по измерениям параметров полученных окатышей.

Наиболее эффективна работа САР с использованием двух подсистем: подсистемы компенсации по возмущению и подсистемы регулирования по отклонению. Последняя может выполнять также роль идентификатора модели подсистемы компенсации по возмущению. Подсистема с компенсацией по возмущению предусматривает наличие модели связи основных управляющих воздействий с размерами окатышей. Для барабанного и чашевого грануляторов такими воздействиями являются частота вращения и угол наклона чаши. Принцип управления окомкователем сводится к выбору с помощью математической модели оптимальных режимов работы при данных показателях сырья, критерием оптимальности в данном случае служит однородность окатышей, а именно минимизация мелких и крупных фракций. Имеющаяся видеоаппаратура и вычислительные средства позволяют вести анализ гранулометрического состава одновременно до 8 окомкователей, что позволяет обеспечить управление грансоставом обжиговой машины. Представляется целесообразным исследование импульсных режимов работы окомкователей, возможность предокомкования и снижения среднего времени окомкования. Внимание следует уделить также вопросу оптимальности установленных различными ГОСТами и рекомендациями параметров окатышей.

Применение гранулометрических систем не ограничивается измерением сфероидных тел. Аналогичные системы можно использовать для автоматизации процессов дробления. Система определения крупности дробленой руды с оптическим методом измерения прошла успешные испытания в 2003 г. и эксплуатируется в настоящее время на дробильно-обогательном комбинате МихГОКа (см. п. 18.4.4). При создании системы для измерения крупности руды использовали аналогичное оборудование, что и для видеодатчиков системы «Индикатор крупности» сырых окатышей. Однако сами принципы измерения, алгоритм обработки видеоизображения и конструкция

датчика существенно изменены для измерения плоских лещадных камней руды и сырых окатышей (см. п. 18.4.4).

18.4.4. Определение размеров дробленого (сыпучего) материала

Особенности устройства Гранулометра

Одно из устройств для автоматического управления процессом дробления материала было разработано под руководством Б.Б. Зобнина [18.92].

В этом устройстве предусмотрено использование датчика крупности дробимого материала, примененного в комплекте с блоком расчета прогнозируемых значений крупности дробленого материала. Для управления крупностью материала используется разгрузочная щель дробилки, размер которой изменяется в зависимости от задания, связанного с оптимизатором крупности. Использование данного устройства (в совокупности с другими блоками) позволяет учесть влияние неконтролируемых возмущающих воздействий на процесс дробления, что обеспечивает повышение качества управления и снижение энергозатрат. Однако в этом устройстве не было предложено устройство для непосредственного определения геометрических размеров дробленного материала.

Способ и система для определения геометрических размеров гранул сыпучего материала были предложены В.Н. Кругловым, как отмечалось, докторантом, работающим при консультациях В. Г. Лисиенко. При этом учтено, что при разработке гранулометра для определения размеров рудных окатышей (форма которой близка к шарообразной) обеспечивается четкая работа блока оценивания устройства за счет чередования четких максимумов и минимумов отраженного от частиц излучения [18.80].

Однако в случае необходимости определения геометрических размеров гранул сыпучего материала произвольной формы (например, дробленой породы перед обогащением) этот способ теряет свои преимущества. В случае определения размеров гранул произвольной формы распределение интенсивности отраженного излучения представляет собой неравномерную функцию по поверхности частицы с уменьшением интенсивности на границе. Четкого чередования минимумов и максимумов нет, их однозначные величины отсутствуют.

Таким образом, стояла задача разработки способа определения геометрических размеров гранул произвольной формы и систему для его осуществления с применением хорошо зарекомендовавшей себя идеи использования неравномерности интенсивности отраженного от гранул излучения на поверхности гранулы и на ее границе.

Эта задача была решена путем определения геометрических размеров гранул сыпучего материала, который подвергают воздействию направленного электромагнитного излучения, измерением двумерного распределения интенсивности отраженного от гранул излучения, выделением минимумов

в распределении интенсивности, последовательным выявлением границ облученных гранул и получением их двумерного контурного изображения.

По нему определяются, например, габаритный (максимальный) геометрический размер каждой облученной гранулы, причем сами гранулы имеют произвольную форму. В качестве статистического распределения используются геометрические размеры облученных гранул.

На рис. 18.27 (видеоизображение) показано, что границы очень размыты, и определить размеры гранул достаточно точно очень сложно.

На рис. 18.28 приведена схема оценки распределения интенсивности – алгоритм обработки видеоизображения. Образованное видеокамерой изображение 1 вначале преобразуется в цифровую форму в цифровом преобразователе 2. Выходной сигнал цифрового преобразователя 2 подводят к блоку 3 подчеркивания граничных точек исследуемых величин.

Выходной сигнал с блока 3 одновременно подается в блок 4 – блок формирования граничных областей по гистограмме функции яркости изображения и в блок 5 – блок формирования граничных областей по градиенту функции яркости изображения. Оба бинарных изображения граничных точек поступают на вход блока 6 – блока связывания граничных точек.

В блоке 7 происходит разметка внутренних точек областей, ограниченных замкнутыми контурами. Размеченные области являются искомыми изображениями облученных гранул, т. е. двумерным контурным изображением (см. рис. 18.27).

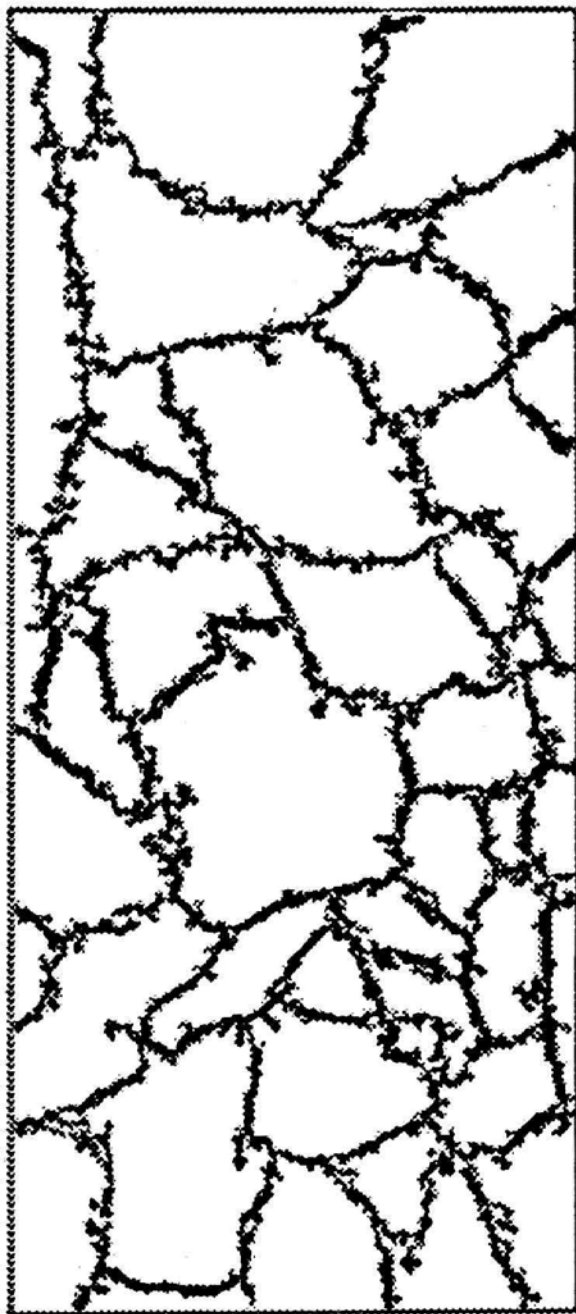


Рис. 18.27. Двумерное контурное изображение распределения облученных гранул

В блоке 8 полученная информация о габаритных геометрических размерах гранул вычисляется статистическое распределение гранул по размерам.

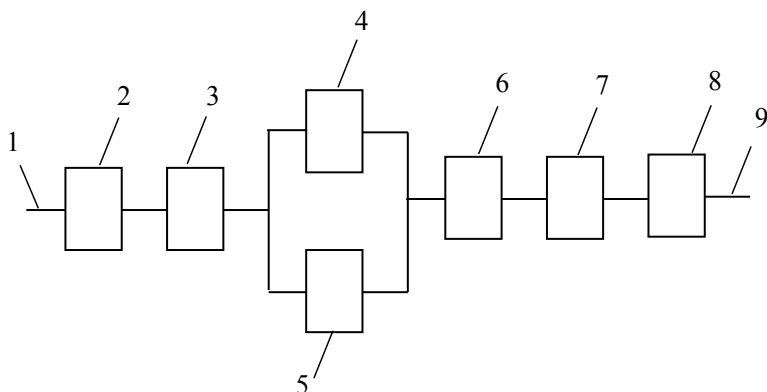


Рис. 18.28. Схема алгоритма обработки видеоизображения:

1 – изображение на видеокамере; 2 – цифровой преобразователь; 3 – блок подчеркивания граничных точек исследуемых гранул; 4 – блок формирования граничных областей по гистограмме функции яркости изображения; 5 – блок формирования граничных областей по градиенту функции яркости изображения; 6 – блок связывания граничных точек; 7 – блоки разметки внутренних точек областей, ограниченных замкнутыми контурами; 8 – статистический модуль вычисления статистических геометрических размеров; 9 – вход в систему

При сканировании каждой размеченной области, например, по четырем направлениям (горизонтальному, вертикальному и двум диагональным), можно определить (максимальный) габаритный геометрический размер каждой. Габаритные геометрические размеры гранул можно определять и другими способами. В качестве критериев размера можно использовать диаметр минимальной описанной окружности, площадь размеченной области и др. Используя двумерное контурное изображение распределения интенсивности отраженного излучения (см. рис. 18.27), можно определять и среднее значение геометрических размеров облученных гранул. В этом случае статистическое распределение не определяется.

Опыт промышленного использования

Изобретение В.Н. Круглова («Индикатор крупности») для определения размеров дробленого материала было использовано для про-

мышленного использования в работах НПВП «ТОРЭКС» совместно с УрФУ (В.Н. Круглов) на Михайловском ГОКе, работе УрФУ (В.Н. Круглов и В. Г. Лисиенко) на предприятии «Эрдэнэт» Монголии, а также опробовалось на дробленом калийном концентрате (В.Н. Круглов) на Михайловском ГОКе.

Как отмечено в работе [18.93; 18.94], проведенной НПВП «ТОРЭКС», проблема повышения технико-экономических показателей обжиговых машин связана с достижением стабилизации состава и свойств концентрата и других компонентов шихты, что в свою очередь связано со сбалансированностью процессов дробления, измельчения руды и ее обогащения.

Первый шаг в стабилизации качества концентрата — попытка определения крупности дробленой руды в режиме реального времени, что стало целью настоящей работы. Опыт, накопленный НПВП «ТОРЭКС» по использованию телеметрической компьютерной системы (ТВКС) «Гранулометр» для определения среднего размера и гранулометрического состава сырых окатышей, позволил предложить аналогичную систему для решения поставленной задачи.

Система «Индикатор крупности» разработана НПВП «ТОРЭКС» при участии УрФУ для измерения гранулометрического состава кусковых сыпучих материалов в технологическом потоке и рассчитана по классу защиты технических средств на применение в тяжелых условиях дробильных отделений ГОКов.

Системой выполняются следующие функции:

- периодическое измерение, регистрация и выдача информации о гранулометрическом составе кусковых сыпучих материалов: гистограмма распределения измеряемых частиц по диаметрам минимальной описываемой окружности, среднему диаметру, площади частиц т. д.;
- сигнализирует об отклонениях гранулометрического состава от заданного технологией;
- включение/выключение обработки информации от конкретного устройства считывания видеоизображения (УСВ);
- юстировка УСВ;
- просмотр информации по гранулометрическому составу для каждой дробилки или окомкователя за указанный период времени;
- контроль работоспособности УСВ;

- определение остановки конвейера;
- видеоконтроль материала на конвейере и работы УСВ;
- управление режимом отображения информации.

В состав системы «Индикатор крупности» входят: устройства считывания видеоизображения; переключатель УСВ; компьютер, в котором установлен модуль преобразования аналогового телевизионного кадра в цифровое изображение и реализованы программные блоки; с их помощью рассчитываются размеры дробленых, гранулированных или окомкованных частиц и проводится их статистическая обработка.

Принцип функционирования индикатора представлен на рис. 18.29. С помощью одного или нескольких УСВ получают исходное изображение дробленого сыпучего материала с различных конвейеров. К вычислительной машине через переключающее устройство можно подключить до 16 УСВ. Полученное видеоизображение преобразуется в цифровую форму. Обработка ведется с помощью алгоритмов, позволяющих выделять контурные изображения дробленых частиц и в дальнейшем измерять их размеры на телевизионном кадре. В результате определяется количественное распределение дробленых, гранулированных или окомкованных частиц, например по диаметрам минимальных описываемых окружностей или по площади частиц и т. д. (см. рис. 18.21).

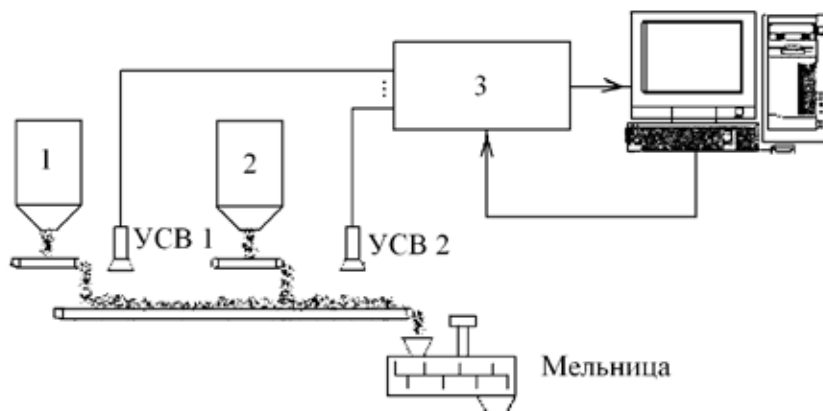


Рис. 18.29. Структурная схема системы бесконтактного измерения размеров дробленого материала:

1, 2 – дробилки № 1 и 2; 3 – переключатель УСВ

Испытания ТВКС «Индикатор» проводил персонал рудоиспытательной лаборатории и дробильно-обогажительного комплекса ОАО «Михайловский ГОК». При этом телекамеру прибора устанавливали над конвейером дробленой руды (см. рис. 18.30).

Отснятые в момент прохождения определенного участка шихты под телекамерой кадры обрабатывались ТВКС с выдачей информации: гистограммы распределения площадей кусков дробленой руды по их классам крупности, массовой доли класса > 16 мм.

Гранулометрический состав материала, отобранного с конвейера, определяли в соответствии с ГОСТ 17495–80 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для гранулометрического анализа». Результаты этих определений и их сравнение с показателями «Индикатора» приведены в табл. 18.4. Полученные результаты — фактическая массовая доля класса > 16 мм (17,5 и 16,2 %) и средневзвешенный диаметр куска (9,8 мм в обоих случаях) свидетельствуют об их хорошей сходимости.

Таблица 18.4

Пример гистограммы распределения площадей кусков дробленой руды по классам (в процентном отношении)

Способ определения	Массовая доля, %; классов, мм										Средний диаметр, мм
	> 25	20–25	18–20	16–18	12–16	10–12	8–10	0–8	Итого	> 16	
ТВКС	3,2	4,4	3,6	5,0	14,9	14,2	11,9	42,8	100	16,2	9,8
Рассев	1,5	6,7	1,9	7,4	15,8	14,9	8,2	43,6	100	17,5	9,8

В результате было отмечено, что телеметрическая компьютерная система «Индикатор крупности» НППВ «ТОРЭКС», смонтированная на конвейере дробленой руды, может использоваться для оперативного контроля крупности исходной рудной шихты в непрерывном режиме работы отделения дробления ДОК по массовой доле класса > 16 мм и средневзвешенному диаметру дробленого куска. Дальнейшее развитие работ может быть направлено на создание алгоритмов управления процессом дробления с целью его последующей автоматизации.

КОО «Предприятие Эрдэнэт» (Монголия)

Особенности разработки. Одной из важных задач «Предприятия Эрдэнэт» (далее Эрдэнэт), как и других горно-обогатительных предприятий, является сокращение энергозатрат в процессе дробления и улучшение качества дробления материала. Как отмечалось, важным фактором при этом является контроль крупности дробления. В этом плане непрерывный контроль крупности дробления (в дополнение к существующим дискретным методам – пробоотборному и ручному отбору) обеспечивает в динамике оперативную информацию и возможность в перспективе (по аналогии с контролем размеров сырых окатышей – см. п. 18.4.1) обеспечить автоматическое управление процессом дробления. Отметим, что предприятие Эрдэнэт является крупнейшим по добыче и обогащению медной и молибденовой руд.

Идея разработки, испытания и внедрения на предприятии непрерывного контроля крупности дробления возникла у В. Г. Лисиенко при поступлении в УрФУ в магистратуру работника предприятия Эрдэнэт И. Хурэлчулууна, руководителем которого автор и являлся. В качестве консультанта выступил В.Н. Круглов, обеспечивающий во многом техническую часть работы. На уровне магистратуры под тем же руководством эту работу продолжили Д. Юндэндорж и О. Цогтбаатар. Магистранты с отличием защитили магистерские диссертации. В результате были оформлены основные предпроектные разработки опытной установки.

В развитие этих работ в 2013 г. УрФУ был заключен с предприятием Эрдэнэт договор на научно-исследовательскую работу «Проведение промышленных испытаний и модернизация оценки крупности дробления руды «ГРАНИКС» (ответственный исполнитель В.Н. Круглов).

С самого начала разработок установка гранулометра дробленой руды (далее он получил аббревиатуру «ГРАНИКС») планировалась на сборном конвейере, куда измельченная руда поступает после нескольких каскадов дробления. Ширина конвейера составляет 1600 мм, для обеспечения точности оценки размеров дробленого материала угол обзора объектива видео-камеры установлен 450 мм. Общий вид установки видеодатчика системы «ГРАНИКС» представлен на рис. 18.30.



Рис. 18.30. Общий вид установки видеодатчика над конвейером

Некоторые особенности функционирования. В дополнение к материалам, изложенным в п. 18.4.1, отметим в разработке В.Н. Круглова конкретные особенности принципа работы и алгоритма функционирования, применение на предприятии Эрдэнэт отмеченной выше системы «ГРАНИКС».

При помощи телевизионной камеры формируется изображение верхнего слоя кусков дробленой руды $F(j, k)$, расположенных на движущемся конвейере (рис. 18.30). В дальнейшем аналоговое видеоизображение поступает в компьютер, где преобразуется в цифровой вид и подвергается обработке.

Алгоритм определения геометрических размеров сыпучих частиц состоит в следующем. На первом этапе исходное изображение обрабатывается медианным фильтром с апертурой размером 3×3 . Полученное в результате изображение подвергается сглаживающей фильтрации при помощи квадратной маски размера 17×17 , состоящей из единичных элементов. Следующий этап – подчеркивание границ – может быть реализован нелинейным методом обнаружения перепадов, основанный на гомоморфной обработке изображе-

ния, предложенный Р. Уоллисом. Согласно этому методу, элемент контрастированного изображения определяется как

$$G(j,k) = \frac{1}{4} \log \left\{ \frac{[F(j,k)]^4}{F(j-1,k)F(j+1,k)F(j,k-1)F(j,k+1)} \right\}. \quad (18.95)$$

В результате перечисленных преобразований получается контурное изображение видимого слоя кусков дробленой руды, представленное на рис. 18.31, *а*.

После того как изображение прошло предобработку производится его сегментация с целью формирования областей, соответствующих изображениям частиц руды. Данная процедура реализуется при помощи алгоритма водораздела. На рис. 18.31, *б, в* приведены результаты работы данного алгоритма.

На следующем этапе для каждой выделенной области рассчитывается ее главная ось, длина которой (E_{2a}) определяется по формуле

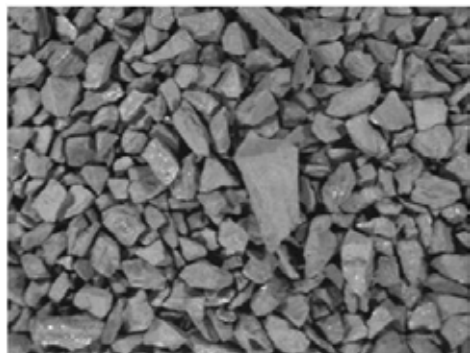
$$E_{2a} = \sqrt{\frac{p^2}{2\pi^2} + \frac{2\pi}{A}} + \sqrt{\frac{p^2}{2\pi^2} - \frac{2\pi}{A}}, \quad (18.96)$$

где p – периметр выделенной области, а A – ее площадь в пикселях.

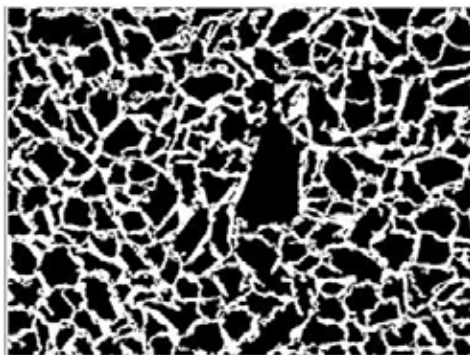
На рис. 18.32 главные оси изображены черными линиями. В направлении, перпендикулярном главным осям выделенных областей, определяется максимальная ширина (E_{2b}) области изображения частицы руды, значение которой рассчитывается согласно выражению

$$E_{2b} = \sqrt{\frac{p^2}{2\pi^2} + \frac{2\pi}{A}} + \sqrt{\frac{p^2}{2\pi^2} - \frac{2\pi}{A}}. \quad (18.96, a)$$

Таким образом, при цифровой обработке таких изображений проводится выделение каждого видимого куска дробленой руды и рассчитываются следующие параметры: площадь куска, его главная ось и наибольший размер куска, определяемый в направлении, перпендикулярном главным осям выделенных областей. Так как именно последний размер будет соответствовать размеру ситового анализа, то и называть его будем размером «ситовки» куска дробленой руды. По полученным результатам строится гистограмма распределения площадей кусков дробленой руды по их размерам «ситовки».



a



б



в

Рис. 18.31. Формирование изображений частиц руды при помощи алгоритма «водораздела»: *a* – исходное изображение кусков дробленой руды на конвейере до обработки; *б* – контурное изображение; *в* – результаты работы алгоритма

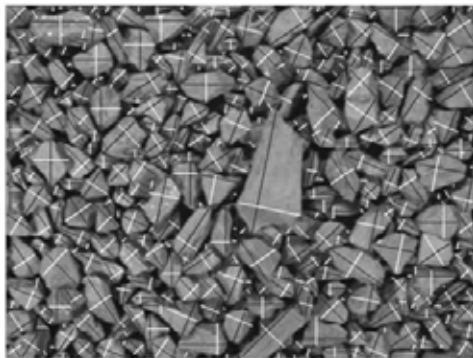


Рис. 18.32. Результаты оценки размеров кусков дробленой руды

Линии, соответствующие максимальной ширине области изображения частицы руды, на рис. 18.32 нарисованы белым цветом.

Для повышения достоверности результатов построение гистограммы проводится не по результатам обсчета одного кадра, а по нескольким, число которых задает оператор. В этом случае процесс обработки выглядит так: первоначально снимают заданное число кадров, после чего они последовательно поступают на обработку, по результатам которой и будет построена итоговая гистограмма, называемая в дальнейшем измерением.

Программное обеспечение системы позволяет обрабатывать видео информацию от 4 камер.

Каждая камера соединена информационным кабелем с одним из входов коммутатора видеосигналов. Конструктивно коммутатор может быть выполнен в виде отдельного внешнего устройства, управляемого при помощи компьютера, или быть встроенным в плату оцифровщика телевизионных сигналов и располагаться непосредственно в компьютере (вариант данной системы).

При поступлении на вход видеосигнала в оцифровщике производится захват телевизионного кадра и его преобразование в цифровое изображение. Цифровое изображение представляет собой прямоугольную матрицу размером 768×576 элементов, каждый из которых представляет собой уровень серого цвета в данной точке. Полученное изображение обрабатывается с целью выделения видимых границ кусков дробленой руды и определения их размеров.

Результатом обработки является распределение площадей кусков дробленой руды по их размерам «ситовки» в диапазоне от 6 до 70 мм с шагом 1 мм. Для удобства конечного пользователя эти результаты могут быть сгруппированы по диапазонам крупности (классам). Диапазоны классов задаются пользователем.

Телевизионная компьютерная система обеспечивает выполнение следующих функций:

- периодическое измерение, регистрацию и выдачу информации о гранулометрическом составе кусковых материалов (дифференциальная и интегральная характеристики распределения материалов по размерам, средний диаметр кусков и т. д.);
- программное подключение/отключение до 4 телевизионных камер и обработка видео изображений, поступающих от них;
- калибровка телевизионной камеры;
- просмотр информации по гранулометрическому составу по каждому датчику, за указанный период времени;
- контроль аварийных ситуаций;
- видеоконтроль работы телевизионной камеры;
- конфигурирование системы;
- управление режимом отображения информации;
- настройка параметров.

В процессе настройки аппаратуры была проведена корректировка программного обеспечения с целью приведения данных измерений к применяемым на предприятии регламентных значений: «Номинальная крупность» (размер отверстий того сита, на котором остались пять процессов) и содержание класса «+ 15 мм».

При этом использовались кубические интерполирующие сплайны.

Разработанный алгоритм автоматического расчета контролируемого показателя «Номинальный размер куска» обеспечивает абсолютную погрешность 0,075 мм, т. е. всего 0,52 % относительную погрешность по сравнению с результатами, полученными по методике предприятия.

Результаты оценки качества работы системы «ГРАНИКС», оценки крупности дробленой руды

Определение гранулометрического состава дробленой руды проводилось по постоянным параметрам работы дробилок и при динамически изменяющихся режимах их работы.

При этом проводилось сравнение показаний системы с ситовой оценкой крупности руды. Результаты показали, что относительная погрешность системы при определении номинального размера дробленой руды составляет всего 3,01 % по сравнению с ситовой оценкой, а при определении контролируемого класса «+ 15 мм» та же погрешность составляет 5,48 %. Кроме этого проведенные промышленные испытания показали, что система четко отслеживает тенденцию изменения гранулометрического состава дробленого материала.

18.5. Развитие экспертных (прогнозных) систем управления доменным процессом и процессом плавки в жидкой ванне

Производство чугуна как базовая отрасль металлургии черных металлов сохраняет своё лидерство и в XXI веке. Пути дальнейшего совершенствования производства чугуна многообразны и при этом значительная роль отводится вопросам управления.

18.5.1. Экспертные системы и трехуровневые АСУ ТП

Доменные процессы и процессы плавки в жидкой ванне относятся к восстановительным процессам с получением в качестве продукта различных чугунов.

Процессы отличаются исключительной сложностью и сочетанием теплообменных, гидродинамических, физико-химических процессов, процессов, связанных с перемещением масс и т. д. Число параметров, участвующих, например, в доменном процессе превосходит цифру 500.

Уровень локальных САР процессами, информационный уровень достаточно хорошо развиты.

Под верхним уровнем АСУ ТП, решающей сложные интеллектуальные задачи, понимается «интеллектуальный модуль», реализуемый в виде пакета прикладных программ.

К такому модулю относятся программно-алгоритмические разработки, которые позволяют реализовать современные подходы к управлению доменным процессом.

Автоматизированный технологический комплекс доменной печи как объект контроля и управления можно характеризовать следующими признаками:

- большим объемом контролируемых переменных и расчетных признаков;
- низкой прозрачностью процесса, так как отсутствует возможность непосредственного контроля развития отдельных стадий процесса выплавки чугуна;
- существенным запаздыванием в получении информации о выходных показателях процесса (продуктах плавки), в связи с чем результаты непосредственного контроля часто не позволяют определять первопричину расстройств хода печи;
- глубокой взаимосвязью всех процессов плавки при ограниченности ресурсов на управление;
- наличием случайных измерительных помех различной природы и характера, что снижает качество информации.

Комплексный подход к учету всей совокупности перечисленных признаков диктует необходимость построения самых современных информационно-управляющих систем.

Кроме того, рост производительности доменных печей увеличил потоки сырья энергии и продуктов плавки, участвующих в процессе производства.

Современная доменная печь объемом 5000 м³ в сутки потребляет 20-23 тыс. т железорудного сырья, кокса, 14 млн. м³ горячего дутья и 1,5 млн. м³ природного газа.

О сложности и взаимосвязанности объектов и параметров в комплексе доменной печи можно, например, судить по рис. 18.34-18.36, в определенной мере отражающих структуру АСУ ТП доменной печи и некоторые обобщенные структурные модельные представления [18.36; 18.95-18.97].

В соответствии с представлениями о трехуровневых АСУ ТП (см. п. 18.1.2) для такого сложного процесса как доменный большое значение в построении и поддержке верхнего уровня управления имеют развиваемые математические модели процесса и связанный с ними так называемый натурно-модельный подход. В свою очередь данный подход представляется в рассмотрении автора как основа суперуровня управления - имитационно-оптимизационного уровня управления* [18.36; 18.67; 18.68; 18.95-18.107].

* Суханов Е.Л. Разработка и внедрение теплотехнической информационно-моделирующей системы доменного процесса: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук / Е.Л. Суханов. - Екатеринбург: УГТУ, 1997. - 59 с.

В этом плане, как неоднократно подчеркивалось, большую роль играют разрабатываемые в УрФУ и Институте металлургии УрО РАН модельные представления, используемые в данных разработках под руководством или при участии автора.

При этом модельные представления являются основой развития как логических, так и логико-количественных экспертных систем управления доменным процессом, а в модельной экспертной системе удалось уже и непосредственно включить математическую модель в комплекс самой системы.

Тем не менее общий ход управления процессом осуществляется технологами (мастерами) с использованием технологических инструкций.

В этом случае значительно возрастает роль экспертных систем, обеспечивающих оценку в реальном времени требуемых воздействий для предотвращения аварийных ситуаций.

В данном параграфе представлены результаты разработки экспертных систем данных процессов, проводимых при участии или при непосредственном руководстве В. Г. Лисиенко [18.108-18.110; 18.111-18.126; 18.132].

При этом основные положения логических и логико-количественных экспертных систем (ЛЭС и ЛКЭС) и создания на их базе тренажеров разрабатывались совместно с Институтом машиноведения УрО РАН, УГТУ-УПИ (УрФУ), Московским институтом стали и сплавов (Национальным исследовательским технологическим университетом-МИСиС), Региональным уральским отделением АИН им. А.М. Прохорова, Научно-производственной фирмой «Прософт-Е». При разработке ЛЭС и ЛКЭС, проводимых при участии и часто при руководстве автора, активную роль играли В.П. Чистов, А.Е. Пареньков, Ф.Л. Скуридин, Б.И. Иванов, Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова, А.Н. Дмитриев, С.А. Загайнов, В.Д. Малюгин, В.Г. Титов, И.А. Кононенко, В.Н. Махов и др.

Первоначальные идеи в плане развития ЛЭС принадлежали, конечно же, В.П. Чистову и тесно сотрудничавшим с ним А.Е. Паренькову и В. Г. Лисиенко.

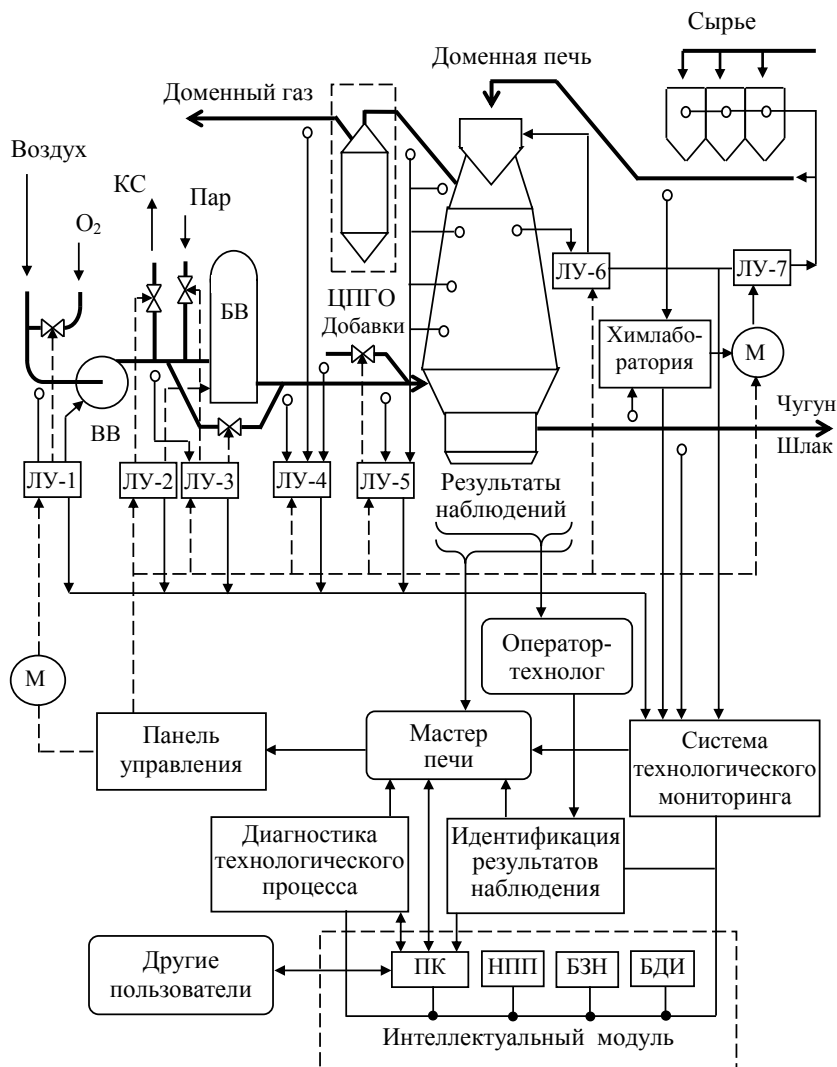


Рис. 18.34. Структура АСУ ТП доменной печи при использовании системы технологического мониторинга с интеллектуальным модулем:
 М – мастера воздуходувки и шихтоподготовки; БВ – воздуходувка;
 КС – клапан «Снорт»; БВ – блок воздуходоувателей; ЦПГО – цех пыле-газоочистки; ЛУ – локальные узлы контроля и регулирования

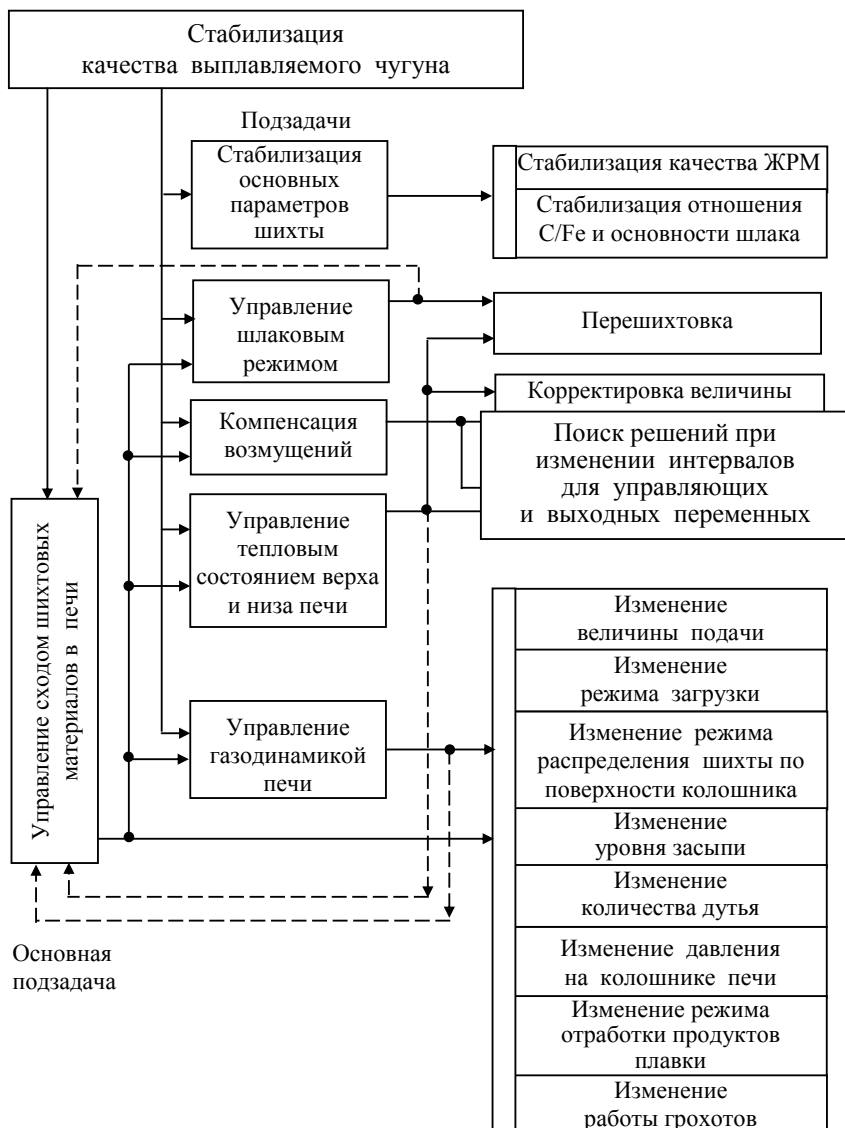


Рис. 18.35. Схема учета взаимосвязей при решении многовариантной задачи «Стабилизация качества выплавляемого чугуна»

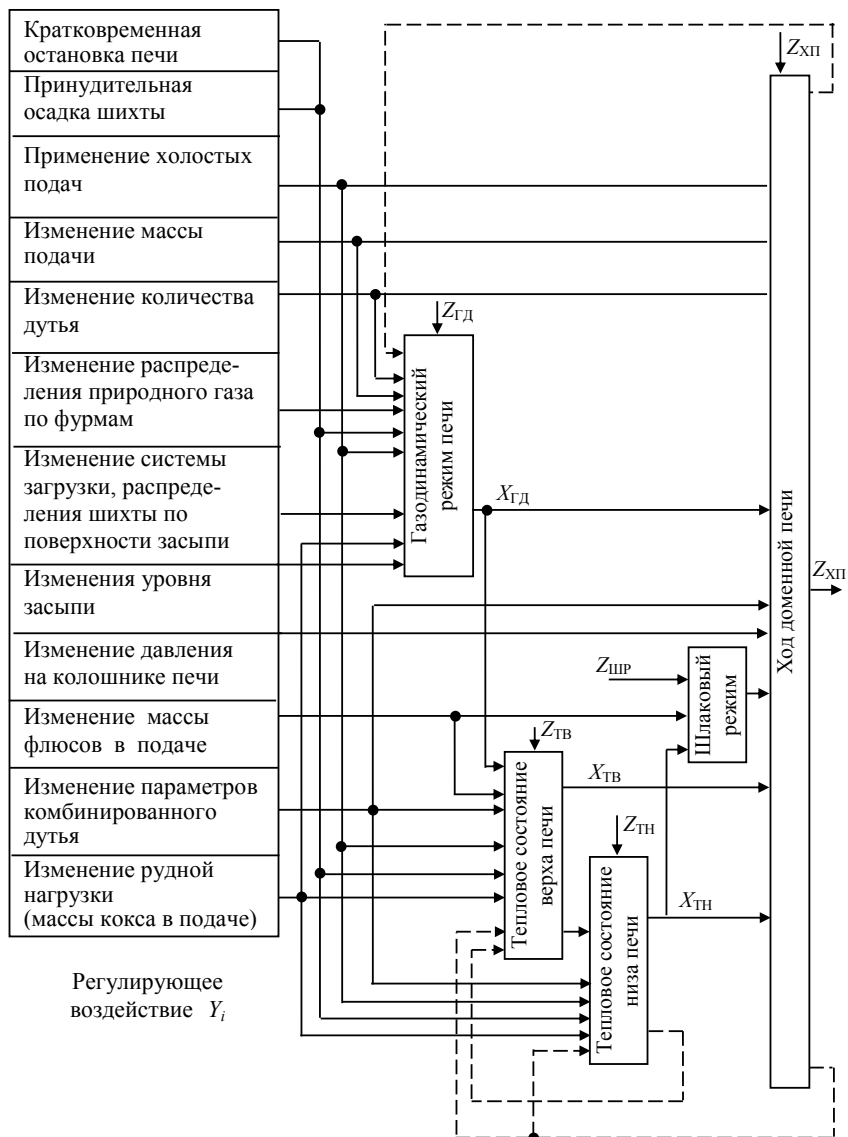


Рис. 18.36. Структура обобщенной модели, отражающей влияние основных регулирующих воздействий Y_i и возмущений Z на развитие процессов доменной плавки

При этом отметим активную роль ряда предприятий, с которыми проводилось сотрудничество и передавались имеющиеся наработки для использования, в частности, в виде тренажеров: Чусовской и Косогорский металлургические заводы, Ново-Липецкий, Магнитогорский и Нижне-Тагильский металлургические комбинаты, ОАО «НОСТА», Южно-уральский никелевый комбинат и др.

В данной главе экспертным системам доменных печей уделено особое внимание как примеру возможности экспертного управления одним из самых сложных технологических объектов — доменной печью. Отдельные вопросы экспертных систем для доменных печей (в развитии) приведены также в п. 18.12.2.

Конечно, нельзя не отметить работы, ведущиеся и в нашей стране и за рубежом, по разработке экспертных систем и соответствующих тренажеров для анализа и прогноза требуемых показателей доменной плавки. Такие работы ведутся, в частности, в Австрии (фирма VAIron), Финляндии (фирма Rautaruukki), Японии и др. Соответствующие системы, например, применяются на Магнитогорском и Нижне-Тагильском металлургических комбинатах.

Тем не менее хотелось бы подчеркнуть, что представленные в данной монографии разработки экспертных систем базируются во многом на самых передовых достижениях в области процессов теплообмена в доменных печах. Как отмечалось, создание и развитие теории теплообмена в доменных печах принадлежит уральской школе доменщиков под руководством Б.И. Китаева, к которой со своим весьма скромным вкладом принадлежат и авторы.

В рамках данной школы и в её развитие применительно к доменным процессам значительная роль принадлежит в настоящее время кафедрам Теплофизики и информатики в металлургии УрФУ (Ю.Г. Ярошенко, Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, и др.) и металлургии чугуна и железа (С.А. Загайнов и др.). Большой вклад вносит Институт металлургии УрО РАН (С.В. Шаврин, А.Н. Дмитриев), а также кафедра Экстракции и рециклинга черных металлов НИТУ-МИСИС (А.Е. Пареньков, В.А. Доброскок, Ю.С. Юсфин и др.).

Материал по развитию трехуровневых АСУ ТП в металлургии (коксовые и бескоксовые процессы) обобщен в учебном пособии [18.36] под редакцией В. Г. Лисиенко (В. Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова, А.Н. Дмитриев, С.А. Загайнов, А.Е. Пареньков).

При этом детально рассмотрены современные проблемы математического моделирования и прогнозирования показателей доменного и жидкофазного процессов.

Еще раз подчеркнем, что в отличие от прогнозных представлений, основанных на достаточно сложных и представительных моделях процессов (теплообмена, газодинамики, восстановления и др.), достаточно хорошо развитых и описанных в приводимой литературе (в том числе, например, в [18.36], экспертные системы управления – это системы, обеспечивающие в режиме «Советчика» управление процессами именно в реальном времени, на действующем технологическом агрегате.

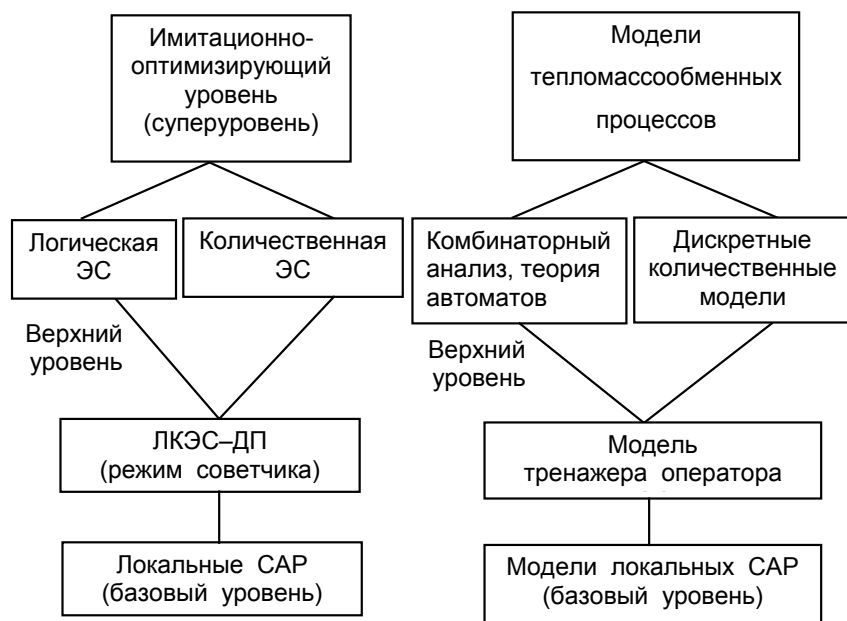


Рис. 18.37. Принципиальная схема триадной АСУ (ТАСУ): применительно к сложному энергонасыщенному объекту – доменной печи

Следуя представлению о трехуровневых АСУ ТП (ТАСУ ТП) (см. п. 18.2) структуру управления в этом случае можно представить в виде схемы рис. 18.37.

При этом имитационно-оптимизирующий уровень определяется развитием методов математического моделирования, достаточно хорошо представленных в работах различных организаций и авторов.

Следует еще раз отметить в этом плане работы уральской школы, возглавляемой Б.И. Китаевым, создателем теории теплообмена в доменной печи, в том числе работы Института металлургии УрО РАН, разработавших балансовую логико-статистическую модель доменного процесса [18.35; 18.36; 18.67; 18.68; 18.95-18.107]. Коротко эти выдающиеся достижения представлены в Т. 2, кн. 1 [18.2].

Однако в силу своей сложности непосредственное использование данных математических моделей в режиме реального времени оказывалось затруднительным. Поэтому-то на первый план и выходили экспертные системы для создания так называемого режима «Советчика мастера».

Эти экспертные системы можно разделить на логические и логико-количественные (ЛЭС и ЛКЭС) [18.108-18.110; 18.111-18.126; 18.132]. Первые связаны с чисто логическими представлениями, вторые уже оперируют конкретными количественными значениями при выработке того или иного «совета» в экспертной системе.

Тем не менее, авторам с коллегами (А.В. Сучков, А.Н. Дмитриев) удалось впервые создать экспертную систему с включенной в её структуру непосредственно двумерной математической модели доменной печи (см. п. 18.5.7).

По классическому определению экспертная система – это программный продукт, в котором используется искусственный интеллект в виде типовых логических правил, содержащихся в базе знаний, заполненной экспертами. Работа системы построена по алгоритму, имитирующему мыслительный процесс.

Экспертные системы управления, как правило, связаны с большими массивами вводимых и выводимых элементов, образованных некоторым сложным устройством или системой, и применяются в тех случаях, когда проблемная область управления непроста и изменчива, в связи с чем необходим процесс рассуждений для выяснения требуемых мер, направленных на достижение цели управления – поддержания работы устройства (системы) оптимальным образом. При этом эффективность работы и качество синтезируемых решений задач зависит от следующих присущих экспертным системам (ЭС) возможностей: мощности и адекватности используемых баз знаний, аккумулирующих знания и опыт специалистов в решении творческих задач в выделенных проблемных областях;

моделирования механизма мышления человека на основе баз знаний применительно к решению задач в некоторой проблемной области; способности формировать определенные соображения и выводы на основе имеющихся знаний, объяснять полученные выводы и решения; умения обучаться и развиваться, т. е. эволюционировать [18.107-18.110].

Энергонасыщенные объекты представляют собой сложные многомерные объекты управления с большим количеством параметров состояния и управляющих воздействий, и являются типичными носителями слабо структурированных, плохо формализованных проблем. Для подобных объектов актуальна разработка систем управления, обеспечивающих экономию ресурсо- и энергозатрат и безопасность их работы. Решения по управлению такими объектами принимаются в весьма противоречивых условиях: с одной стороны, в решениях желательно учитывать как можно больше факторов, различающихся по значимости и влиянию на качество решения, и данных, с другой – необходимо заботиться о повышении качества принимаемых решений. Ярким примером энергонасыщенных объектов управления являются такие сложные металлургические агрегаты, как доменные печи, агрегаты ПЖВ, а также протекающие в них процессы. Использование при управлении подобными объектами аппарата ЭС обеспечивает достижение более высокой эффективности за счет перебора большого числа альтернатив при выборе решения, опираясь на высококачественный опыт группы специалистов, анализируя влияние большого объема новых факторов, оценивая их при построении стратегий, добавляя возможности прогноза.

Для размещения базы знаний в ЭВМ с целью ее использования для решения прикладных задач, необходимо ее описание с помощью моделей. В связи с этим основное внимание уделяется разработке моделей представления, извлечения и структурирования знаний, изучению проблем создания баз знаний, которые являются ядром ЭС. Интегрированные (гибридные) модели представления знаний сочетают в себе различные виды интеллекта: логический, вычислительный, образный, поисковый. В работах под руководством В. Г. Лисиенко и, в частности, В.А. Морозовой более четко сформулирована концепция и технология создания (методология построения) баз знаний экспертных систем управления, названных в связи с

особенностями модельной поддержки логико-количественными, на примере энергонасыщенных многомерных металлургических технологий и, в частности, доменной печи и агрегата ПЖВ.

На *первом этапе* процесса создания проектируется логическая составляющая модельной поддержки баз знаний логико-количественных экспертных систем. Данный этап включает следующие направления работ (см. п. 18.5.2):

1) формирование базы данных выходных параметров и управляющих воздействий;

2) создание концептуальной модели (модели предметной области), состоящей из описания объектов и их взаимосвязей, полученного на основе анализа данных об объектах и связях между ними, сбора информации о данных в существующих и возможных прикладных программах;

3) построение стратегической логической поведенческой модели энергонасыщенного объекта (например, доменной печи) в виде определенного множества пар «состояние – управление», при этом «состояние» определяется выходными параметрами состояния, а «управление» – управляющими воздействиями и, в частности, отклонениями выходных параметров и управляющих воздействий от состояния «норма»; в процессе построения используются технологические инструкции, опыт работы и данные математического моделирования;

4) собственно разработку логической составляющей модельной поддержки баз знаний логико-количественных экспертных систем (ЛКЭС), представляющую собой логические модели в виде таблиц соответствия выходных параметров и управляющих воздействий.

Преимуществами использования табличного метода реализации стратегических целей экспертной системы (и базирующегося на нем логического советчика, обеспечивающего поддержку принимаемых решений) при управлении энергонасыщенными объектами (например, доменной печью) являются:

- повышение оперативности управления;
- обеспечение выдачи совета оператору в реальном времени и, как следствие;
- снижение расхода кокса и предотвращение расстройств и аварийных состояний хода энергонасыщенного объекта.

На *втором этапе* логическая составляющая модельной поддержки баз знаний ЛКЭС дополняется количественными соотноше-

ниями (см. п. 18.5.3). В качестве примера могут быть построены количественные модели управления энергонасыщенным многомерным объектом (например, доменной печью) с компенсацией по возмущению (инвариантная система) и по отклонению, при этом количественные модели с компенсацией по возмущению предлагается использовать в двух вариантах – в виде модели эквивалентного сохранения и модели критериального отклонения.

Преимуществами использования при управлении энергонасыщенными объектами (например, доменной печью) количественных моделей, дополняющих логический советчик, являются:

- снижение расходов основных энергоносителей (например, для доменной печи – кокса, природного газа (топливных добавок) и кислорода);

- обеспечение протекания ровного хода энергонасыщенного объекта.

В результате использование логико-количественной модельной поддержки баз знаний ЭС должно обеспечить управление сложным энергонасыщенным объектом не только в режиме советчика, но и с использованием замкнутых контуров управления и контроля. При этом опыт построения баз знаний ЭС, использующих логико-количественную модельную поддержку и создаваемых при решении задач управления таким энергонасыщенным объектом, как доменная печь, может быть использован для управления другими энергонасыщенными процессами в металлургии, например, процессами прямого легирования стали и сплавов.

На *третьем этапе* логико-количественная модельная поддержка баз знаний ЭС дополняется имитационными моделями, лежащими в основе компьютерных тренажеров, которые широко применяют для обучения и извлечения знаний. Компьютерные тренажеры являются результатом моделирования реального мира, воссоздают любой объект (или производственную ситуацию) и снабжены программой, описывающей его поведение в реальных условиях. Иными словами, имитационные модели, лежащие в основе компьютерных тренажеров, представляют образный интеллект проектируемой базы знаний ЛКЭС, способствующий максимальной активизации образно-интуитивных механизмов мышления. Эффективность компьютерного тренажера зависит от адекватности лежащей в его основе математи-

ческой модели: следствием возможно более полного и точного воспроизведения в модели свойств и характеристик объекта является ощущение меньшей разницы между реальной и виртуальной обстановкой – так называемый эффект личного участия, который, в свою очередь, влияет на запоминание информации.

Применительно к энерготехнологическому объекту управления – доменной печи актуальной являются разработка имитационных моделей и создание на их основе комплексной системы оценки и повышения квалификации персонала. Особенностью данной системы является органичное сочетание тестовой системы, предназначенной для контроля знаний и навыков персонала по набору определенных правил (техника безопасности и т. п.), а также для общего ознакомления с производственным (доменным) процессом, и динамического тренажера на базе математической модели объекта управления (доменной печи), предназначенного для изучения физических основ и способов функционирования агрегата, проведения экспериментов, для обучения определенному порядку действий (например, способам управления доменной печью), для проблемного обучения, противоаварийных тренировок и анализа аварий.

При формировании базы тестовых заданий (БТЗ) использован разработанный (при участии А.В. Сучкова) общий подход для ее структурирования с использованием иерархического метода классификации. Иерархическая структура БТЗ включает следующие уровни:

- темы тестирования;
- виды профессиональной деятельности специалиста;
- объекты профессиональной деятельности специалиста;
- наборы решаемых задач для каждого объекта;
- конкретные тестовые задания, связанные с объектами и задачами профессиональной деятельности специалиста.

Комплексный динамический тренажер разработан на основе достаточно полной и качественной математической модели Института металлургии УрО РАН, описанной в работах [18.101-18.105] и включающей в качестве математических моделей-компонент балансовую (равновесную) и двумерную, состоящую, в свою очередь, из моделей газодинамики, теплообмена, восстановления, зоны когезии (см. п. 18.5).

Дальнейшее развитие связано с созданием интегрированных моделей представления и баз знаний для ЛКЭС управления энергонасыщенными (в том числе бескоксовыми) процессами получения высоколегированных сталей и сплавов. Базой для этого могут служить разработанные и запатентованные технологические способы, применение которых в сочетании с математическим моделированием и оптимизацией процесса обеспечивает снижение энергоёмкости процесса, уменьшение себестоимости продукции за счёт замены кокса и природного газа на дешёвые угли, в том числе углеродсодержащие отходы [18.1-18.4].

Остановимся более подробно на разработке и применении экспертных систем применительно к так называемым чугуноплавильным процессам: доменным печам и агрегатам ПЖВ (процессам жидкофазного восстановления).

При этом следует учитывать известные принципы автоматического управления - по контролируемому возмущению, по отклонению (с использованием обратной связи) комбинированный; и по заданной временной программе изменений выходного показателя - используются для решения задач регулирования сравнительно простых объектов.

Реализация задач контроля и управления сложными технологическими объектами, как, например, доменная печь, требует совершенно иного подхода. Условия функционирования доменной печи характеризуются комплексом многомерных показателей, которые отражают развитие взаимосвязанных газодинамически, теплообменных и физико-химических процессов в разных частях рабочего пространства печи. Интенсивность развития отдельных процессов зависит не только от применения управляющих воздействий «снизу» (изменение параметров дутьевого режима) или управляющих воздействий «сверху» (режима загрузки в печь шихтовых материалов), но и от существенного влияния неконтролируемых возмущений (ошибки дозирования, определения химического состава шихтовых материалов и др.).

Особенностью и сложностью доменной печи как объекта управления, как отмечалось, является относительная автономность развития основных процессов в верхней и нижней зонах печи. Динамические свойства этих процессов различны: газодинамические процессы - малоинерционны; теплообменные и физико-химические процессы обладают большой инерционностью.

За продолжительный период развития и совершенствования доменного производства, конечно же, отработана технология оперативного управления ходом доменной плавки, основанная на использовании системы дискретных оценок результатов наблюдений за состоянием плавки.

Разработка такой системы оценок осуществляется с участием наиболее опытных технологов-доменщиков как «основных экспертов».

Однако увеличение объема агрегатов и их производительности, необходимость улучшения качества продукции, освоения новых технологий требуют и дальнейшего совершенствования систем управления, включая экспертные прогнозные системы.

18.5.2. Диагностика воздействий на тепловое состояние доменной печи

Одним из важнейших практических результатов теории теплообмена в доменных печах явилась разработка теплотехнических основ управления доменным процессом. Эта разработка во многом предопределила и обеспечила развитие представлений о современных методах управления доменной плавкой и, конечно же, явилась основой многих конкретных систем управления. Важным этапом была оценка с использованием теории теплообмена качественного и количественного влияния воздействий (входных величин) на тепловое состояние верха и низа доменной печи (на выходных величинах) большая честь принять участие в данных разработках, конечно же, под руководством Б.И. Китаева.

Таким образом, рассматриваемые разработки проводились с участием В. Г. Лисиенко и под руководством Б.И. Китаева в рамках развиваемой Б.И. Китаевым и его сподвижниками теории теплообмена в доменной печи. Разработанные положения теории теплообмена позволили на высоком научном уровне подойти к обоснованию теплотехнических основ автоматического управления таким сложнейшим объектом как доменная печь. Учебный курс под таким названием применительно к шахтным и сталеплавильным печам разработал и читал в течение ряда лет Б.И. Китаев. Автору посчастливилось прослушать этот курс лекций и записать их конспект, который затем был частично использован при разработке и написании автором (совместно с Б.И. Китаевым и В.И. Лобановым) пионерского учебного курса «Теплофизика металлургических процессов».

Прежде всего отметим, что рассматриваемая работа являлась одной из первых печатных работ, посвященных оценке влияния воздействий на тепловое состояние доменной печи, в дальнейшем это направление активно развивалось как в научном, так и в учебном плане [18.136]. Её рассмотрение представляет интерес в историческом плане, как и всякое событие, открывающее новые пути решения тех или иных проблем.

Как известно, в работах Б.И. Китаева, Ю.Г. Ярошенко, В.С. Швыдкого, Е.Л. Суханова, Ю.Н. Овчинникова, Н.А. Спирина, и др. было предложено оценивать тепловое состояние доменной печи по индексу верхней и нижней зон теплообмена [18.95-18.97; 18.125; 18.133-18.139].

В частности, была показана целесообразность оценки теплового состояния верха доменной печи по индексу температурного поля, представляющего собой среднеинтегральную температуру слоя шихты в области не прямых восстановлений, выраженную в долях от температуры начала интенсивного развития процессов прямого восстановления. Величина индекса i_B определяется по формуле

$$i_B = 1 - \left\{ \frac{t_{к.г} - t_{\phi}}{t_{к.г} - m(t_{ш} + \Delta t)} \cdot \frac{1 - \exp \left[- \frac{\alpha_{\Sigma V} S}{W_{ш}} (1 - m) H \right]}{\frac{\alpha_{\Sigma V} S}{W_{ш}} (1 - m) H} - \frac{m \Delta t}{t_{к.г} - m(t_{ш} + \Delta t)} \right\}. \quad (18.97)$$

Здесь $t_{к.г}$ и $t_{ш}$ – температура колошникового газа и загружаемой шихты;

Δt – разность температур между газом и шихтой на нижней границе зоны умеренных температур;

$m = W_m / W_g$ – отношение теплоемкостей потоков шихты и газа;

S – площадь поперечного сечения шахты;

H – высота области не прямых восстановлений;

$\alpha_{\Sigma V}$ – объемный суммарный коэффициент теплопередачи с учетом внутреннего теплового сопротивления кусков.

Выражение для индекса температурного поля и дает возможность оценить воздействия, которые используются для изменения теплового состояния шахты доменной печи, и определить соотношения между ними.

Качественная характеристика воздействий. Из двух групп воздействий была рассмотрена только одна, связанная с параметра-

ми дутья. В сравнении со второй группой, обусловленной параметрами загрузки шихты, можно считать, что в определенной мере параметры первой группы более эффективны, например, в том плане, что они относятся к типу «быстрых» воздействий, т. е. оказывают влияние на тепловое состояние печи после изменения дутья.

Вдувание природного газа увеличивает количество фурменных газов. Так как тепловой эффект реакции конверсии метана значительно меньше теплового эффекта горения углерода кокса до CO , то теоретическая температура на фурмах будет уменьшаться по мере увеличения расхода природного газа. Однако нетрудно показать, что в целом вдувание природного газа при постоянном расходе кокса будет иметь слабый положительный эффект в тепловом балансе нижней ступени теплообмена.

Для «верха» печи вследствие увеличения теплоемкости потока газов и объемного коэффициента теплопередачи вдувание природного газа является сильным положительным воздействием. Относительно скорости воздействия можно, не вдаваясь в подробности, отметить, что оно начнет проявляться через несколько минут, однако переходный процесс может длиться часами.

Вдувание мазута действует аналогично, но его положительное влияние на нижнюю ступень теплообмена сильнее.

Повышение температуры дутья изменяет тепловое состояние только нижней ступени теплообмена. В верхней ступени оно остается постоянным, так как весовой расход, а следовательно, и теплоемкость потока газов в этом случае не изменяются.

Таким образом, изменение температуры дутья является естественно локальным для нижней ступени теплообмена (нейтральным для верхней ступени) воздействием.

Влажность дутья. Реакция взаимодействия водяного пара с углеродом кокса сопровождается отрицательным тепловым эффектом, поэтому для нижней ступени теплообмена изменение влажности дутья является отрицательным воздействием, усугубляющимся тем, что реакция восстановления закиси железа водородом имеет эндотермичный характер. Однако в результате вдувания водяного пара при неизменном расходе сухого дутья количество фурменных газов увеличивается. Поэтому теплоемкость потока газов возрастает, что приводит к некоторому увеличению индекса температурного поля.

Обогащение дутья кислородом представляет наибольший интерес. Если влияние остальных воздействий на тепловое состояние ка-

кой-либо зоны имеет вполне определенный знак, то обогащение дутья кислородом в зависимости от температуры дутья может вызвать либо разогрев нижней ступени теплообмена, либо ее похолодание. При некоторой критической температуре дутья увеличение в нем содержания кислорода не меняет теплового состояния низа печи.

Поскольку в результате обогащения дутья кислородом теплоемкость потока газов уменьшается, верхняя ступень теплообмена холодает. Следует особо подчеркнуть, что увеличение содержания кислорода в дутье является очень сильным отрицательным воздействием на тепловое состояние верхней ступени теплообмена (увеличение концентрации кислорода в дутье на 1 % снижает температуру колошникового газа почти на 19 °С).

Таким образом, одно и то же воздействие по-разному влияет на верхнюю и нижнюю ступени теплообмена. Подбором воздействий с разными знаками можно ослабить влияние любого из них. Это положение иллюстрируется табл. 18.5, в которой знаки «+» и «-» означают соответственно накопление и утрату тепла шихтой, а «0» – нейтральное воздействие.

Таблица 18.5

Качественная характеристика воздействий
на тепловое состояние доменной печи

Воздействие	Качественная динамическая характеристика	Знак действия	
		на верхнюю ступень	на нижнюю ступень
Увеличение расхода: кокса	Медленное	+	+
природного газа (холодного)	Быстрое	+	0
мазута	"	+	+
Увеличение: температура дутья	"	0	+
влажности дутья	"	+	-
содержания кислорода в дутье*	"	-	+
			0
			-
* Знак данного воздействия определяется температурой дутья, т. е. тем количеством теплоты, которое вносится азотом дутья по сравнению с работой без дувания кислорода			

Отметим, что изменение расхода кокса относится уже не к «быстрым», а к «медленным» воздействиям, так как оно связано с довольно длительным прохождением кося по высоте доменной печи в зону фурменных очагов.

Количественная характеристика воздействий

Количественная оценка различных воздействий возможна на основе сравнения их влияния на индекс температурного поля i . Для пояснения методики расчета характеристик воздействий рассмотрим влияние вдувания природного газа на тепловое состояние шахты доменной печи. В целях упрощения полагаем, что природный газ состоит только из метана.

При вдувании 1 кмоль метана в зоне фурменных очагов образуется, согласно реакции конверсии, 4,88 кмоль газов. Поскольку реакции непрямого восстановления с участием H_2 и CO не сопровождаются изменением объема газов, то можно считать, что вдувание n модулей природного газа увеличивает количество приходящих в шахту газов на величину $\Delta V_r = 4,88 \times 22,4 n = 109,3 n$. При этом теплоемкость потока газов возрастет на величину $\Delta W_r = 1,61 \times 109,3 n = 176 n$, где 1,61 - средняя в пределах верхней ступени теплообмена удельная теплоемкость газа. Так как инъекция различных видов топлива при постоянном расходе кокса практически не сказывается на теплоемкости потока шихты, то величину m в уравнении (18.97) можно заменить выражением

$$m = \frac{W_{ш}}{W_r} = \frac{W_{ш}}{W'_r + \Delta W_r} = \frac{W_{ш}}{W'_r + 176 n}, \quad (18.98)$$

в котором W'_r вычисляется по показателям работы печи в доинжекционный период.

При количественной оценке воздействий следует учесть и изменение коэффициента теплопередачи $\alpha_{\Sigma V} = \frac{\alpha_V}{1 + \frac{1}{5} Bi}$. Нетрудно

показать, что при вдувании природного газа внешний коэффициент теплообмена α_V меняется в соответствии с формулой:

$$\alpha_V = AV_{\text{к.г}}^{0,9} \left(1 + 0,9 \frac{\Delta V_{\text{к.г}}}{V_{\text{к.г}}} \right), \quad (18.99)$$

$$\text{где } A = 175,6 \text{ } M' \frac{T^{0,3}}{d^{0,75} S^{0,9}}; \quad (18.100)$$

T – средняя температура газов, °К;

d – диаметр кусков, м;

M' – коэффициент, зависящий от относительного содержания мелочи;

$Ві$ – критерий Био, рассчитанный на один кусок;

$V_{\text{к.г}}$ – расход колошникового газа, м³/ч.

Некоторое увеличение объемного коэффициента теплопередачи произойдет вследствие роста коэффициента теплопроводности газов. Однако учет этого приращения затруднен тем, что расчет коэффициента теплопроводности смеси газов не подчиняется правилу аддитивности.

Температуру колошниковых газов можно найти из теплового баланса верхней ступени теплообмена:

$$t_{\text{к}} = t_0 - \frac{W_{\text{о}}}{W_{\text{г}} + 176 n} [t_0 - (t_{\text{ш}} + \Delta t)], \quad (18.101)$$

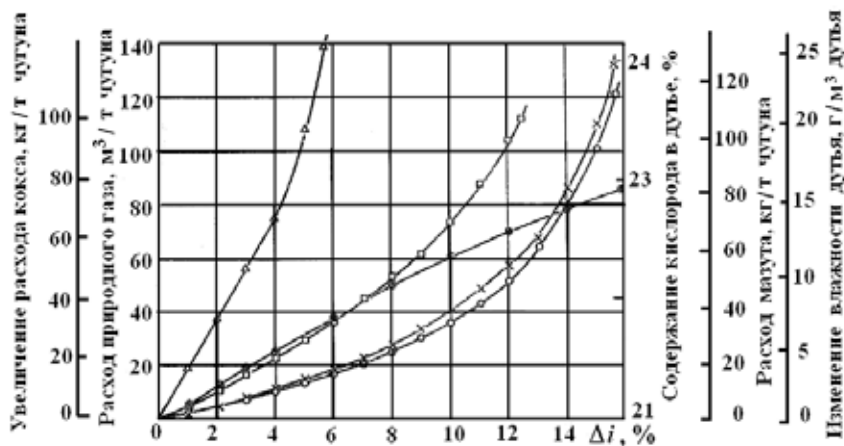


Рис. 18.38. Соотношения изменения индекса температурного поля $\Delta i_{\text{в}}$ в зависимости от влажности дутья (Δ), расхода кокса (\square), содержания кислорода в дутье (\bullet), расхода природного газа (x) и мазута (\circ)

Если разность температур между газом и шихтой на нижней границе зоны умеренных температур принять равной 20 °С [18.125], то для n молей природного газа с учетом исходных данных (типичных показателей работы доменной печи объемом 1513 м³ при выплавке передельного чугуна) и выражений (18.98)-(18.101) можно рассчитать и построить зависимость $\Delta i(\%) = f(n)$.

Результаты расчетов для $n = 0-6$ представлены на рис. 18.38. Таким же способом рассчитаны изменения индекса температурного поля при других воздействиях.

Сопоставляя количественные характеристики воздействий, соответствующие единице изменения индекса, получим соотношения между ними (табл. 18.6). В частном случае (для кокса, природного газа и мазута) это будут эквиваленты замещения. Например (рис. 18.38), для изменения индекса поля (верха) на 8 % необходимо увеличивать расход кокса на 47 кг/т чугуна или вдвухать 26,9 м³/т чугуна природного газа (24,2 кг/т чугуна мазута). Следовательно, эквивалент замещения кокса природным газом или мазутом составляет 1,70 кг кокса на 1 м³ природного газа или 1,90 кг кокса на 1 кг мазута (табл. 18.6).

Отметим, что изменение температуры колошника в соответствии с формулой (18.97) часто является синхронным отражением изменения индекса i_v .

Таблица 18.6

Количественные соотношения между различными воздействиями на тепловое состояние верхней ступени теплообмена

	Мазут (на 1 кг)	Природ- ный газ (на 1 м ³)	Скипо- вой кокс (на 1 кг)	Влага (на 1 г/м ³ дутья)	Кисло- род (на 1 % О ₂)	Температу- ра колош- ника*) (на 1 °С)
Мазут, кг	-	0,88	0,526	0,605	22,0	0,837
Природный газ, м ³	1,140	-	0,588	0,747	24,9	0,975
Скиповой кокс, кг	1,9	1,7	-	1,3	42,0	1,725
Влага дутья, г/м ³	1,655	1,340	0,770	-	26,0	1,0
Кислород, %	0,0455	0,0401	0,0238	0,0385	-	0,0526
Температура колошника, °С	1,19	1,05	0,58	1,0	19,0	-

*) Температура колошника приведена для характеристики относительной значимости воздействия

Таким образом, было установлено, что одни и те же воздействия по-разному изменяют тепловое состояние отдельных зон доменной печи. Комбинируя воздействия с разными знаками, можно искусственно получить локальное воздействие.

Была предложена методика расчета воздействий и рассчитаны соотношения между ними для типичных условий работы доменной печи.

Интересно отметить, что эти первые полученные результаты по воздействиям на тепловое состояние доменной печи находят свое подтверждение вплоть до нашего времени. Так в учебном пособии Б.И. Китаева, изданном почти два десятка лет после опубликования первой пионерской работы приводятся близкие данные как по качественным, так и по количественным параметрам указанных воздействий [18.125].

При этом отмечено, что если воздействия влияют на тепловое состояние только одной из ступеней теплообмена, то они являются локальными. К таким воздействиям относятся изменения температуры дутья и его влажности. Другие воздействия, связанные с рудными нагрузками, обогащением дутья кислородом, инъекцией топливных добавок влияют на тепловое состояние обеих ступеней теплообмена, т. е. всей печи, изменяя температурные поля по всей печи.

Для иллюстрации качественной оценки воздействий приведена табл. 18.7 (см. также табл. 18.5). В этой таблице знак «+» означает повышение температуры, знак «-» понижение температуры, знак «0» свидетельствует об отсутствии влияния на температурное поле данного воздействия.

Таблица 18.7

Качественная оценка воздействий на тепловое состояние
доменной печи

№№ п/п	Наименование воздействия	Знак воздействия на		Примечание
		верх	низ	
1	Обогащение дутья кислородом		+ - 0	$t_d < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_d > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_d = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$
2	Повышение температуры дутья	0	+	-
3	Увеличение влажности дутья	0	-	-
4	Увеличение инжектируемого топлива	+	+	-
5	Увеличение рудной нагрузки	-	-	-

Количественная оценка воздействий была представлена отдельно для верха и низа печи.

Для верха доменной печи она производится из условия $i_b = idem$, а для низа — на базе расчетов теплового баланса, который следует составлять не для всей печи, а только для нижней ступени теплообмена.

Для некоторых случаев данные по количественной оценке представлены в табл. 18.8 и 18.9 (см. также табл. 18.6 и рис. 18.38).

При этом отмечено, что значения коэффициентов указаны в таблицах приблизительно, они даны для общей ориентации. Для получения более точных цифр необходимо учитывать конкретные параметры доменного процесса. Кроме того, важно знать характеристики переходного процесса после нанесения воздействия, т. е. необходимо знать динамику процесса. Особенно сложно рассчитывать коэффициенты соотношения для инъекции в случае комбинированного дутья, т. е. в случае применения природного газа и кислорода. С помощью табл. 18.6-18.8 можно решать различные логико-количественные практические задачи. Например, сопоставление эквивалентов (увеличение расхода природного газа 0,74 в табл. 18.8 и 6,5 в табл. 18.9) показывает, почему при инъекции топлив через фурмы (в целях экономии кокса) горн, как правило, стынет и для компенсации необходимы разогревающие воздействия: увеличение температуры дутья, уменьшение влажности или уменьшение содержания Si в чугуна. Конечно, обязательным условием должен быть высокий уровень технологии в целом и, в частности, высокий уровень подготовки шихты.

Таблица 18.8

Количественные (ориентировочные) соотношения между воздействиями на тепловое состояние верха доменной печи

№№ п/п	Наименование воздействия	Номера воздействий			
		1	2	3	4
1	Увеличение расхода углерода кокса на 1 кг	—	1,36**	19,1	1,0 кг/К
2	Увеличение расхода природного газа на 1 м ³	0,74	—	13,5	0,71 м ³ /К
3	Увеличение % O ₂ в дутье на 1 %	0,064	0,06	—	0,053 %/К
4	Реакция температуры колошника, К	1	1,4	19 $\frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{O}_2}$ *	—

Примечание: * - это цифра приблизительная и дана для температуры колошника 170 °С.
 ** - коэффициент дан для случая, когда дутье не обогащается кислородом. При обогащении его величина значительно снижается. Знак перед коэффициентом (см. табл. 18.7)

Как видим, приведенные данные и сопоставления во многом подтверждают ранние выводы о качественном и количественном характерах влияния воздействий на тепловое состояние верха и низа доменной печи.

В заключение еще раз отметим, что получаемые соотношения, базирующиеся на теории теплообмена в доменной печи, могут являться одной из важных основ для развития логико-количественной экспертной системы управления доменной печью.

В этом плане представляют интерес обработанные автором материалы и данные других авторов по влиянию характерных воздействий на параметры теплового состояния доменных печей в конкретных заводских условиях [18.36], во многом подтверждающие выводы теории теплообмена как в качественном, так и количественном отношении (см. п. 18.5.4).

Таблица 18.9

Количественные (ориентировочные) соотношения между воздействиями на тепловое состояние низа доменной печи

№№ п/п	Наименование воздействия*	Номера воздействий			Результат на 1 % Si
		1	2	3	
1	Увеличение расхода кокса, кг		0,16	1,6	50
2	Увеличение температуры дутья (t_d), °C	6		10	300
3	Увеличение влажности дутья (h), г/м ³	0,6	0,1		30
4	Увеличение расхода природного газа, м ³	6,5	1,08	10,8	

Примечание: * - знак коэффициентов соответствует данным табл. 18.7

18.5.3. Логические экспертные системы доменной печи и агрегата ПЖВ

Как отмечалось, управление сложными энергонасыщенными много-мерными объектами практически невозможно решать обычными методами прямого автоматического управления. В этом случае целесообразно оснащать такие объекты экспертными системами, работающими в режиме советчика.

При этом следует учесть, что многие задачи управления сложными промышленными процессами часто невозможно решить обыч-

ными приемами из-за очень большой сложности математических моделей, их описывающих. Эти методы управления хорошо работают при полностью детерминированном объекте управления, а для систем с неполной информацией и высокой сложностью объекта оптимальными являются нечеткие методы управления.

Нечеткая логика основана на использовании оборотов естественного языка («норма», «больше», «меньше») и теории нечетких множеств, где функция принадлежности множеству не бинарна (да/нет), а может принимать любые значения в диапазоне от 0 до 1.

К сложным промышленным процессам следует отнести процесс выплавки чугуна в доменной печи и агрегате РОМЕЛТ (процесс жидкофазного восстановления железа), разработанный в МИСиС (Национальный исследовательский технологический университет-МИСиС) под руководством проф. В.А. Роменца [18.111].

Построение логической экспертной системы управления для доменной печи

Многие энергетические и энерготехнологические агрегаты представляют собой сложные многомерные объекты управления с большим количеством параметров состояния и управляющих воздействий. Как отмечалось, именно к таким объектам относятся доменные печи.

С точки зрения автора, первым шагом на пути управления такими сложными объектами, как доменная печь, является построение экспертной системы с использованием логических моделей. Далее такая система должна быть дополнена и количественными соотношениями по принципам, изложенным в п. 18.5.4.

Как отмечалось во введении, разработка логической экспертной системы проводилась в содружестве с коллективами Института машиноведения УрО РАН, УГТУ – УПИ (УрФУ), НИТУ - МИСиС, РУО АИН [18.35; 18.112–18.125] и закреплена патентом на изобретение [18.126].

Задачей данной экспертной системы является обеспечение выдачи достоверной информации оператору для управления объектом - доменной печью в реальном времени и удешевление стоимости экспертной системы за счет применения доступной вычислительной техники в виде, например, персональных компьютеров.

Указанная задача решается за счет того, что экспертная система, реализующая на подготовительном этапе сбор и обработку информации об объекте – доменной печи, обеспечивает в реальном времени пошаговый прогноз – совет оператору о необходимых действиях (изменениях управляющих воздействий) по выводу выходных параметров доменной печи (производительность, содержание кремния в чугуне, температура колошника, перепад давления по высоте печи, содержание двуокиси углерода в колошниковом газе и др.) от некоторого отклоненного от нормального состояния («норма») – т. е. «больше» или «меньше» нормы – к нормальному состоянию «норма». Таким образом, в данном способе для характеристики состояния объекта используют троичную логику с признаками состояний: «норма» (=), «больше» (>), «меньше» (<). При этом нормальным состоянием объекта – доменной печи – считают состояние, определяемое технологическими инструкциями, опытом работы и математическим описанием и моделированием процессов, реализующее поддержание выходных параметров доменной печи на требуемом уровне для обеспечения требуемой производительности и качества чугуна при минимальном расходе кокса и других топливных добавок, энергоносителей и материалов и обеспечивающее нормальный (безаварийный) ход доменной печи. Любые отклонения от нормального состояния («норма») в большую («больше») или меньшую («меньше») сторону, выходящие за пределы допустимой погрешности измерений (1–3 %), считают отклонениями от нормального состояния и требуют соответствующего изменения входных управляющих параметров доменной печи. Изменение управляющих параметров также определяют в рамках троичной логики значениями «норма», «больше» или «меньше» нормы, а их выбор определяют на основании технологических инструкций, опыта работы и математического описания и моделирования процессов в доменной печи.

При этом на основании технологической инструкции, опыта работы и данных математического моделирования формируется так называемая стратегическая логическая поведенческая модель печи в виде определенного множества пар «состояние - управление» доменной печи, при этом «состояние» определяется выходными параметрами состояния, а «управление» – управляющими воздействиями и, в частности, отклонениями выходных параметров и управляющих воздействий от состояния «норма».

Используя указанное множество пар, логическое вычислительное устройство, построенное в виде таблиц или композиции блоков, устанавливает качественные зависимости между выходными параметрами и управляющими воздействиями печи в виде знака отклонения от нормы выходного параметра («больше» или «меньше») и соответствующего этому знаку знака («больше» или «меньше») управляющего воздействия. Кроме того, задается последовательность изменения управляющих воздействий на каждом устанавливаемом шаге управления для приведения к норме выходных параметров. На основании действий данного логического вычислителя в зависимости от состояния печи и формируется совет мастеру-технологу о способе и порядке использования управляющих воздействий. В частности, на каждом шаге управления формируется прогноз поведения печи и ее перехода в следующее состояние, и этот процесс продолжается вплоть до предсказанного установления всех выходных параметров в положение «норма».

Примером и наглядным отражением указанных принципов прогноза является стратегическая логическая модель доменной печи, представленная в виде табл. 18.10. Аналогичные модели могут представляться в виде системы блоков с соответствующими связями.

Отметим, что построение этой таблицы, выбор управляющих воздействий, возмущающих воздействий и выходных параметров зависит от типа печи, вида выплавляемых чугунов, наличия тех или иных средств инжекции топлива и подачи кислорода и т. д. Основой построения таблицы является техно-логическая инструкция, теоретические и модельные представления о процессе и опыт экспертов. Например, качественная и количественная оценка воздействий на тепловое состояние доменной печи определяется, исходя из теории теплообмена в доменной печи, разработанной Б.И. Китаевым с коллегами (см. п. 18.5.2) [18.96; 18.133-18.139; 18.167; 18.168].

Таблица приведена в качестве примера как возможный вариант оценки воздействий.

Построение данной таблицы и функционирование на ее основании экспертной системы находятся в соответствии с теорией дискретных автоматов, основой которой, как известно, являются наличие дискретного множества внутренних состояний и свойства скачкообразного перехода (в рамках определенного промежутка

времени – интервала дискретного автомата) из одного состояния в другое [18.127].

Таблица 18.10

Таблица соответствия выходных параметров
и управляющих воздействий

$m_j U_j \backslash n_i U_i$	P	r	Si	r	t_k	r	Δp	r	CO ₂	r	W_k^{*2}	r
V_d	-	1	+	8	-	7	-	1	+	5	-	6
W_d	-	5	+	1	-	6	+	5	-	6	-	2
t_d	--	4	-	2	+	9	-	7	-	7	+	3
O _{2д}	-	2	+	4	-	1	+	3	+	10	-	4
ПГ _д	+	6	-	3	-	3	-	2	-	9	+	5
R_n^*	-	3	+	5	+	2	-	4	+	1	-	1
E_d^{*3}	-	10	-	10	+	10	+	10	-	8	+	10
A*	-	7	+	6	+	4	-	8	+	2	-	7
B*	+	8	-	7	-	5	+	9	-	3	+	8
У ₃	+	9	-	9	-	8	+	6	+	4	+	9

Обозначения:

$m_j U_j$ - выходные параметры; $n_i U_i$ - управляющие воздействия; r - ранги воздействий; P - производительность печи; Si - содержание кремния в чугуна; t_k - температура колошника; Δp - общий перепад давления; CO₂ - содержание CO₂ в колошниковом газе; W_k - влажность кокса; V_d - расход дутья; W_d - влажность дутья; t_d - температура дутья; O_{2д} - содержание кислорода в дутье; ПГ_д - расход природного газа или других топливных добавок; R_n - рудная нагрузка; E_d - кинетическая энергия дутья; A и B - типы загрузки, соответственно прямой (РРКК) и обратной (ККРР); здесь P – подача рудной части загрузки, K – подача кокса; У₃ - уровень засыпи; * - регулирующие воздействия сверху, их воздействие на низ печи достигается через 5-6 ч после нанесения воздействия; *² - W_k - влажность кокса здесь рассматривается как помеха (возмущающее воздействие); *³ - E_d - комплексный показатель, определяемый диаметром фурмы и расходом дутья. Изменение диаметра фурмы возможно лишь в ремонтный период печи.

При этом принято для таблиц переходов и выходов строки таблиц обозначать входными сигналами автомата, а столбцы – его состояниями. В нашем случае входными сигналами являются управляющие воздействия, а параметрами состояния автомата – выходные параметры состояния доменной печи.

Табл. 18.10, в частности, включает 6 важнейших выходных параметров доменной печи (производительность, содержание кремния в чугуна, температура колошника, перепад давления по высоте печи, содержание двуокиси углерода в колошниковом газе, влажность кокса) и 10 управляющих воздействий (расход дутья, влажность дутья, температура дутья, содержание кислорода в дутье, расход природного газа, рудная нагрузка, кинетическая энергия дутья, типы загрузки шихты, уровень засыпи) и устанавливает в рамках троичной логики соответствие каждому из трех состояний выходных параметров ($=$) определенного (для приведения в нормальное состояние – «норму») значения управляющих воздействий: прямого, соответствующего изменению выходных параметров ($=$), или обратного, соответствующего обратному состоянию управляющих воздействий ($> <$). При этом, естественно, значение «норма» ($=$) выходного параметра соответствует значению «норма» управляющего воздействия. В таблице прямые воздействия отражены знаком (+), обратные – знаком (-).

Кроме того, таблица соответствия устанавливает ранжирование для каждого изменения выходного параметра соответствующих управляющих воздействий. Номер ранга (место по значимости воздействия) при этом определяется как оптимальный из совокупности двух факторов – наибольшей степени значимости влияния данного управляющего воздействия на соответствующий выходной параметр и наименьшей степени влияния на все другие выходные параметры, кроме рассматриваемого, то есть наибольшей степени кумулятивности (избирательности) данного управляющего воздействия.

При этом суммарный критерий оптимальности для оценки ранга i -го воздействия $K_{i\Sigma}$ определяется по соотношению

$$K_{i\Sigma} = K_i + \frac{1}{\sum_{\gamma} K_{\gamma i}}, \quad (18.102)$$

а условием выбора и оценки номера ранга является соотношение

$$K_{i\Sigma} = K_{i\Sigma\max}, \quad (18.103)$$

где K_i – коэффициент усиления (передачи) параметра i по данному воздействию i ; $K_{\gamma i}$ – коэффициент усиления всех остальных параметров γ по данному воздействию i .

В табл. 18.10 этот ранг управляющего воздействия отражается цифрами, возрастающими по убывающей значимости.

Представленная таблица отражает наиболее типичное для доменного процесса соответствие выходных параметров и управляющих воздействий, основанное на обобщении технологических инструкций, производственного опыта, данных расчетов и математического моделирования доменных печей ряда комбинатов и заводов. В случае внесения существенных изменений в специфику доменного процесса (например, в случае выплавки специальных чугунов, ферросплавов и т. д.) эта таблица может быть соответственно несколько видоизменена.

В данном способе при установлении с помощью системы сбора и обработки информации (СОИ) отклонения любого из выходных параметров, представленных в таблице, от состояния «норма» (=) в большую (>) или меньшую (<) сторону обеспечивается изменение управляющих воздействий в соответствии с таблицей: при знаке (+) – изменение, соответствующее выходному параметру, при знаке (–) – обратное. При этом на каждом шаге определяется текущий знак отклонения j -го выходного параметра от нормы, исходя из соотношения

$$\pm \Delta y_j = y_j - y_{jn}, \quad (18.104)$$

где y_j – текущее значение j -го выходного параметра; y_{jn} – нормальное значение j -го выходного параметра; Δy_j – алгебраическая разница текущего и нормального значения j -го выходного параметра. В случае получения величины Δy_j со знаком «+» данному отклонению j -го параметра присваивается индекс «больше нормы» («больше» или «>»). В случае получения Δy_j со знаком «-» данному отклонению j -го параметра присваивается индекс «меньше нормы» («меньше» или «<»). При величине $\Delta y_j \leq \delta_j$ (здесь δ_j – величина метрологически допустимого отклонения параметра j от нор-

мы, задаваемая равной K от диапазона изменений параметра, здесь K – класс точности определения параметра) данному отклонению j -го параметра присваивается индекс «норма» или « = ».

После данной оценки на каждом шаге k выбирается для данного j -го параметра индекс управляющих воздействий U_j ранга 1 в соответствии с табл. 18.10. В случае идентификации j -го параметра – y_j индексом «>» и соответствия в таблице для j -го воздействия ранга 1 знака «+» j -е управляющее воздействие U_j выбирается с индексом «больше» или « > ». В случае идентификации j -го параметра индексом « > » и соответствия в таблице для j -го воздействия знака «-» j -е управляющее воздействие выбирается с индексом « < ». В случае идентификации j -го параметра – y_j индексом « < » j -е управляющее воздействие при знаке « + » в таблице выбирается со знаком «<» и при знаке «-» в таблице – со знаком « > ».

Параметр y_j считается приведенным к «норме» на данном шаге в случае реализации соответствующего, требуемого по таблице, изменения управляющего воздействия U_j .

При этом в первую очередь, на шаге k изменяется управляющее воздействие, обозначенное рангом 1. Как видно из таблицы, в силу многомерности объекта – доменной печи – изменение на шаге k одного из управляющих воздействий U_{jk} с целью ликвидации отклонения от нормы на этом шаге одного из выходных параметров y_{jk} может повлечь за собой в соответствии с таблицей изменение других выходных параметров y_{zk} . Для их приведения к норме на шаге $k+1$ используются соответствующие управляющие воздействия U_{jk+1} , в первую очередь обозначенные рангом 1. В случае совпадения по рангу управляющего воздействия, измененного для первого из отклоненных от нормы выходных параметров, с рангом этого воздействия для другого выходного параметра используется для этого выходного параметра воздействие под рангом 2. В дальнейших итерациях ($k+1$) в случае совпадения рангов данного управляющего воздействия на шаге « k » и « $k+1$ » используется ранг управляющего воздействия на единицу больше ранга управляющего воздействия на предыдущем шаге. Т. е., обозначая ранг j -го воздействия U_{jk} по параметру y_{jk} индексом l_{jk} в случае совпадения на шаге $k+1$ ранга у

j -го воздействия U_{jk} по параметру y_{zk+1} с рангом этого воздействия U_{jk+1} на шаге $k+1$ l_{zk+1}

$$l_{jk} = l_{zk+1}, \quad (18.105)$$

для z -го воздействия по параметру y_{zk+1} на шаге $k+1$ выбирается ранг воздействия на единицу больше предыдущего

$$l_{zk+1} = l_{jk} + 1. \quad (18.106)$$

Данные итерации продолжаются до приведения всех выходных параметров y_j в положение «норма».

Указанные итерации реализуются в пошаговом режиме в условном времени, например, через каждые 30 мин. На первом шаге производится изменение управляющих воздействий в соответствии с требуемым изменением выходных параметров и рангом воздействий. На втором шаге ликвидируются возможные последствия выхода из нормального состояния выходных параметров вследствие нанесения первых управляющих воздействий и т. д. Как указывалось, итерационный процесс продолжается до тех пор, пока все выходные параметры не будут приведены к состоянию «норма».

Способ также обеспечивает контроль логического вычислительного устройства доменной печи на управляемость. При этом задается любое ненормативное состояние выходных параметров и устанавливается значение «норма» всех управляющих воздействий. Далее производится запуск устройства. Признаком управляемости логического вычислительного устройства считается приведение к «норме» в результате работы устройства всех выходных параметров доменной печи.

Отметим, что непосредственное использование в процессах управления логической табл. 18.10 наиболее удобно при отклонении от положения «норма» одновременно одного или двух параметров состояния доменного процесса. При одновременном отклонении от состояния «норма» большего количества параметров состояния выбор управляющих воздействий непосредственно с помощью табл. 18.10 может быть затруднен вследствие возможного противоположного влияния управляющих воздействий на отдельные параметры состояния, многоступенчатости переходных состояний и т. д. Так, в

соответствии с теорией комбинаторного анализа [18.128; 18.129], при наличии q множеств – в данном случае это логические признаки состояний выходных параметров (в рамках троичной логики это «меньше», «равно», «больше») – и числа выборов n количество возможных комбинаций параметров состояний объекта равно

$$k = q^n. \quad (18.107)$$

Например, при $q = 3$ и $n = 4$ количество комбинаций параметров состояний объекта уже равно 81 и при большем количестве q и n оно соответственно формуле (18.107) увеличивается.

Конечно, одновременное отклонение от положения «норма» сразу нескольких параметров состояния явление довольно редкое, но в принципе оно может иметь место.

Для возможной реализации управления при таких сложных случаях с использованием табл. 18.10, которая в этом случае является стратегической или базовой таблицей, обрабатываются вспомогательные или тактические таблицы состояний объектов на случай одновременного изменения n параметров состояния. При разработке этих вспомогательных или тактических оперативных таблиц используются известные правила комбинаторного анализа и данные табл. 18.10, которая в этом случае выполняет как бы стратегические функции.

При этом с использованием таблиц состояний на каждом шаге по времени обрабатываются требуемые воздействия до перевода объекта в состояние «норма».

В реальных условиях управления принимаемое количество комбинаций состояний объекта, которое определяется степенной зависимостью (18.107), зависит от наличия соответствующей памяти и быстродействия вычислительных устройств.

Например, для современных реальных условий управления может быть принята при $q = 3$ величина $n = 4-5$ и для этих условий строятся вспомогательные оперативные логические таблицы параметров состояний объекта.

Упрощение модели параметров состояний осуществляется также при декомпозиции табл. 18.10 и разбиении ее на отдельные блоки, связанные между собой.

Так, одним из вариантов декомпозиции принято разбиение табл. 18.10 на два взаимосвязанных блока: блок теплового состояния и блок управления перепадом давления.

При этом блок теплового состояния представлен выходным параметром – содержанием кремния в чугуне Si . Выходными параметрами являются рудная нагрузка R_H , расход природного газа $ПГ_d$, содержание влаги в дутье W_d , температура дутья t_d . При этом расход природного газа $ПГ_d$ и содержание кислорода в дутье O_{2d} для упрощения считаются взаимосвязанными. Блок управления перепадом давления представлен выходным параметром – перепадом давления Δp и управляющим воздействием – расходом дутья V_d .

Пример вспомогательных (тактических) таблиц состояния для этого случая упрощения и декомпозиции табл. 18.10 представлен табл. 18.11 и 18.12, построенными в соответствии с теорией комбинаторного анализа.

Табл. 18.11 отражает три параметра состояния: перепад давления Δp , содержание кремния в чугуне Si и текущее значение расхода дутья V_d . Управляющими воздействиями являются устанавливаемый расход дутья V_d и обобщенный параметр $E_{об}$, представляющий в обобщенном виде количество энергии, вносимой в доменную печь и отражающей влияние управляющих воздействий W_d , t_d , $ПГ_d$ и R_H дутья по их воздействию на тепловое состояние горна (на содержание кремния в чугуне Si) в соответствии с табл. 18.10. При наличии трех признаков состояний выходных параметров («меньше», «равно», «больше») $q = 3$ и числа параметров состояния $n = 3$ в соответствии с формулой (18.107) размерность такой таблицы будет равна $k = 3^3 = 27$.

Таблица 18.11

Вспомогательная логическая таблица соответствия параметров состояния (Si , Δp , V_d) и управляющих воздействий (V_d , $E_{об}$)

Текущие значения			Новые значения			Текущие значения			Новые значения			Текущие значения			Новые значения		
Si	Δp	V_d	V_d	$E_{об}$	Si	Δp	V_d	V_d	$E_{об}$	Si	Δp	V_d	V_d	$E_{об}$	Si	Δp	V_d
<	<	>	=	>	<	<	<	=	>	<	<	=	=	>	<	<	>
=	<	>	=	=	=	<	<	=	=	=	<	=	=	=	=	<	=
>	<	>	=	<	>	<	<	=	<	>	<	=	=	<	>	<	<
<	=	=	=	>	<	=	>	=	>	<	=	<	>	>	<	=	>
=	=	=	=	=	=	=	>	=	=	=	=	<	<	=	=	=	=
>	=	=	=	<	>	=	>	=	<	>	=	<	<	<	>	=	<
<	>	<	<	>	<	>	=	<	>	<	>	>	<	>	<	>	>
=	>	<	<	=	=	>	=	<	=	=	>	>	<	=	=	=	=
>	>	<	<	<	>	>	=	<	<	>	>	>	<	<	>	>	<

При работе одновременно пользуются вначале табл. 18.11, затем табл. 18.12, которая устанавливает порядок подключения указанных источников энергии ($W_{\text{д}}$, $t_{\text{д}}$, $\Pi\Gamma_{\text{д}}$ и $R_{\text{н}}$) при обобщенном количестве энергии $E_{\text{об}}$ «больше» ($>$) и «меньше» ($<$) нормы. При наличии трех признаков состояний выходных параметров $q = 3$ и числе параметров состояния $n = 4$ размерность табл. 18.12 равна $k = 3^4 = 81$.

При отработке реакции управляющих воздействий (новое состояние) на текущую ситуацию (текущие значения) придерживались следующих принципов. Ранги воздействий выбираются в соответствии со стратегической табл. 18.10. Каждое состояние и реакция на него представляет один шаг во времени, при этом в требуемое состояние («меньше», «норма», «больше») переводится только одно из управляющих воздействий. В табл. 18.12 представлены реакции управляющих воздействий при необходимости увеличения $E_{\text{об}}$ в соответствии с табл. 18.11. При необходимости уменьшения $E_{\text{об}}$ знаки изменяемых управляющих воздействий меняются на противоположные, хотя возможны и некоторые вариации рангов воздействий при необходимости увеличения или уменьшения величины $E_{\text{об}}$.

На рис. 18.39 представлена схема, реализующая рассматриваемую экспертную систему. Она содержит: доменную печь 1, включающую систему загрузки 2, подачу дутья 3 с вводом в дутье влаги 4, кислорода 5 и топливных углеродосодержащих добавок 6 (природный газ, жидкое топливо, пылеугольное топливо, горячий восстановительный газ и др.), выпуск чугуна и шлака 7, вывод колошниковога газа 8; датчики величин – выходных параметров: производительности (скорости схода шихты) 9, содержания кремния в чугуне 10, температуры колошника 11, общего перепада давления 12, содержания CO_2 13 в колошниковом газе, влажности кокса 14; датчики величин – управляющих воздействий: расхода дутья 15, влажности дутья 16, температуры дутья 17, содержания кислорода в дутье 18, расхода природного газа или других углеродосодержащих топливных добавок (мазут, угольная пыль, горячий вос-

становительный газ) 19, кинетической энергии дутья 20, рудной нагрузки 21, системы загрузки А и В 22 и 23, уровня засыпи 24; вычислительные блоки: системы сбора и обработки информации (СОИ) 25, базы данных 26, корректировки базы данных 27, логической модели 28, корректировки логической модели 29, блока обработки сигналов 30, генератора шагов во времени 31, ввода данных при анализе системы на управляемость 32, блоки контроля системы на управляемость 33, а также блок отображения информации – дисплей 34 и, кроме того, блок задания периодичности времени измерений 35 и блок отображения информации системы сбора и обработки информации 36.

При этом выходы датчиков величин – выходных параметров 9, 10, 11, 12, 13 и 14 и выходы датчиков величин – управляющих воздействий 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 и 24 соединены с входом вычислительного блока системы сбора и обработки информации 25, выход вычислительного блока ввода данных при анализе системы на управляемость 32 соединен с входом в вычислительный блок базы данных 26, выходы вычислительных блоков системы сбора и обработки информации 25 и корректировки базы данных 27 также соединены с входами в вычислительный блок базы данных 26, выход вычислительного блока корректировки логической модели 29 соединен с входом вычислительного блока логической модели 28, выходы вычислительных блоков базы данных 26, логической модели 28 и генератора шагов во времени 31 соединены с входом вычислительного блока обработки сигналов 30, выход которого соединен с входом блока отображения информации – дисплея 34. Выход блока контроля системы на управляемость 33 соединен с входом вычислительного блока обработки сигналов 30.

Выход блока задания периодичности времени измерений 35 соединен с входом блока сбора и обработки информации 25, а выходы блоков 25 и 26 соединены с блоком отображения информации 36.

Таблица 18.12

Вспомогательная логическая таблица изменений состояния управляющих воздействий (W_d, t_d, Π_d, R_n) при необходимости увеличения обобщенного количества энергии ($E_{об}$)

[illegible]

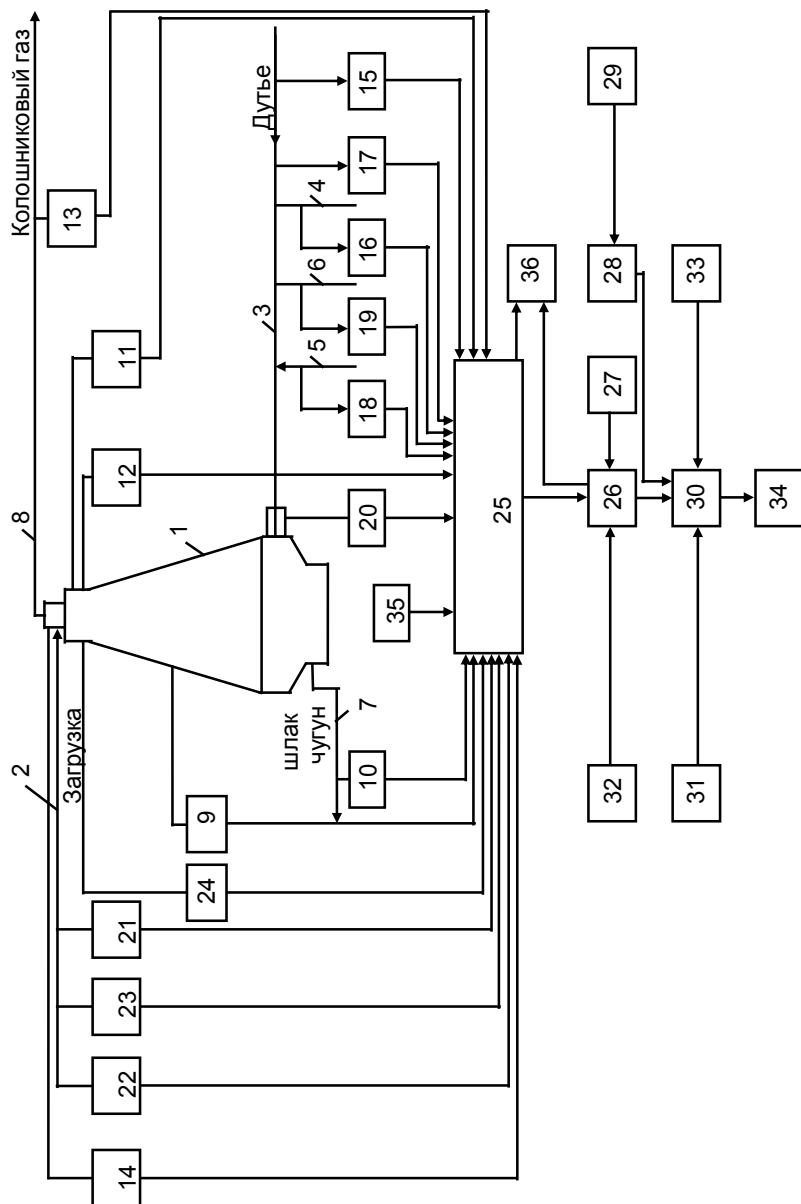


Рис. 18.39. Схема, реализующая экспертную систему управления доменной печью

Схема работает следующим образом.

Датчики величин – выходных параметров 9, 10, 11, 12, 13 и 14 измеряют соответственно производительность (скорость схода шихты), содержание кремния в чугуне, температуру колошника, общий перепад давления, содержание CO_2 в колошниковом газе и влажность кокса.

Датчики величин – управляющих воздействий 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 и 24 измеряют соответственно расход дутья, влажность дутья, температуру дутья, содержание кислорода в дутье, расход природного газа или других углеродосодержащих топливных добавок (мазута, угольной пыли, горячего восстановительного газа), рудную нагрузку, определяют систему загрузки и уровень засыпи.

Сигналы всех этих датчиков поступают в вычислительный блок системы сбора и обработки информации 25, в котором нормируются и переводятся в числовой код. Данные о величинах выходных параметров и управляющих воздействий поступают в вычислительный блок базы данных 26, в котором содержатся данные о значениях всех указанных величин, представляющих «норму», т. е. величину, соответствующую нормальному протеканию технологического процесса в доменной печи. Данные об этих нормированных значениях величин могут корректироваться с помощью вычислительного блока корректировки базы данных 27. Данные о значениях величин выходных параметров и их номинальных значениях «норма» передаются в вычислительный блок обработки сигналов 30. В этот же блок вводятся данные из вычислительного блока логической модели 28, представляющей собой табличный код в виде логической табл. 18.10 или ее тактических модификаций типа табл. 18.11 и 18.12 и устанавливающей логическую связь между величинами выходных параметров и управляющих воздействий (в виде соотношений «меньше», «норма», «больше»), а также ранги соответствующих управляющих воздействий в виде приоритетной последовательности управляющих воздействий для данного выходного параметра.

При этом вычислительный блок генератора шагов 31 формирует последовательность шагов во времени с задаваемым шагом по времени $\Delta\tau_k$.

На каждом шаге по времени k в вычислительном блоке 30 определяется знак отклонения текущего значения j -го выходного параметра y_j от нормы y_{jn} , исходя из соотношения (18.104).

В случае получения величины Δy_j со знаком «+» данному отклонению присваивается индекс «больше», в случае получения величины Δy_j со знаком «-» – «меньше». При величине $\Delta y_j \leq \delta_j$, где δ_j – величина допустимого отклонения параметра j от «нормы», задаваемая равной K от диапазона изменения параметра (здесь K – класс точности определения данного параметра), отклонению j -го параметра присваивается индекс «норма».

После данной оценки на каждом шаге по времени k выбирается для данного j -го параметра индекс управляющих воздействий ранга 1 U_j в соответствии с табл. 18.10. В случае идентификации j -го параметра – индексом «больше» ($+\Delta y_j$) и соответствия в таблице для j -го управляющего воздействия – U_j знак «+» j -е управляющее воздействие отбирается со знаком больше ($>$), а в случае знака «-» – со знаком меньше ($<$). В случае идентификации j -го параметра – y_j со знаком «меньше» ($-\Delta y_j$) и соответственно в табл. 18.10 для управляющего воздействия U_j знака «+» j -е управляющее воздействие отбирается со знаком меньше ($<$), а в случае «-» – со знаком больше ($>$).

Параметр считается приведенным к «норме» на данном шаге k в случае соответствующего таблице выбора и фиксации изменения управляющего воздействия U_j .

При дальнейшей работе устройства на следующем шаге k фиксируются возможные изменения остальных выходных параметров y_{zk} в случае изменения управляющего воздействия U_{jk} . Для их приведения к норме на шаге $k+1$ используются соответствующие управляющие воздействия – U_{jk+1} из табл. 18.10, в первую очередь обозначенные рангом 1. В случае совпадения по рангу управляющего воздействия, примененного для предыдущего из отклоненных от нормы выходных параметров y_{jk} с рангом этого воздействия для другого выходного параметра y_{jk+1} , для приведения к норме этого выходного параметра используют воздействие под рангом 2. В дальнейших итерациях – шагах во времени в случае совпадения рангов данного управляющего воздействия на шаге k и $k+1$ используется ранг управляющего воздействия на единицу больше ранга управляющего воздействия на предыдущем шаге.

Данные итерации продолжаются последовательно во времени до приведения всех выходных параметров в положение «норма».

Указанные итерации в виде соответствия состояний выходных параметров и управляющих воздействий на каждом шаге («больше», «меньше», «норма») отображаются на дисплее 34 и являются конечной информацией – «советчиком» технолога. При анализе вычислительного устройства на управляемость в вычислительный блок системы сбора и обработки данных 26 через блок ввода данных 32 искусственно вводятся данные о выходных параметрах, отклоненных от нормы. В этом случае блок 30 блоком 33 переключается в режим контроля управляемости. При этом процесс приведения выходных параметров к норме происходит в той же последовательности, как это описано выше. Признаком управляемости является приведение к норме всех выходных параметров при любых заданных вариантах отклонения выходных параметров от нормы. В случае невыполнения условия управляемости возможна корректировка математической модели с помощью блока 29 или нормированных значений выходных параметров с помощью блока 27.

При работе устройства текущие значения выходных параметров и управляющих воздействий и их отклонения от нормы фиксируются на дисплее 36, а время периодичности фиксации и усреднения информации задается блоком 35.

Схема для упрощенного представления табл. 18.10 в виде табл. 18.11 и 18.12 приведена на рис. 18.40. На этом рисунке: 1 – доменная печь; 2 – блок автоматического и ручного задания управляющих воздействий (последнее необходимо в режиме «тренажера»); 3 – блок базы данных (таблица состояний) по изменению управляющих воздействий 7–11; 4 – блок базы данных (таблиц состояний) по изменению управляющего воздействия 12; 5 – узел измерения содержания кремния в чугуна; 6 – узел измерения перепада давления; 7 – рудная нагрузка; 8 – температура дутья; 9 – влажность дутья; 10 – расход природного газа; 11 – расход кислорода; 12 – расход дутья; 13 – изменение энергетического состояния (индекса) $E_{об}$ доменной печи; 14 – текущее значение расхода дутья. При этом база данных 3 включает данные табл. 18.12. База данных 4 включает данные табл. 18.11. В табл. 18.11 и 18.12 величина $E_{об}$ определяет необходимость применения энергетического воздействия на верх и низ доменной печи при изменении содержания кремния в чугуна.

Знаки и ранги конкретных воздействий ($W_{\text{д}}$, $t_{\text{д}}$, $\Pi\Gamma_{\text{д}}$ и $R_{\text{н}}$) при этом определяются, как указывалось, в соответствии с табл. 18.10.

Указанная схема (рис. 18.40) работает следующим образом. При изменении содержания кремния в чугуне $\text{Si} - 5$ и перепада давления $\Delta p - 6$ соответствующие сигналы поступают в блок базы данных 4, где в соответствии с табл. 18.11 определяются необходимые воздействия в виде изменения расхода дутья $V_{\text{д}} - 7$ и индекса $E_{\text{об}} - 13$. Далее при необходимости изменения индекса $E_{\text{об}}$ в соответствии с базой данных (табл. 18.12) блок 3 выбирает изменение воздействий на верх доменной печи в виде рудной нагрузки 7 и низ доменной печи в виде воздействий 8–11. Блок 2 реализует работу устройства в автоматическом режиме или в режиме тренажера. В конкретных условиях при работе устройства на определенные управляющие воздействия могут накладываться ограничения в соответствии с технологическими инструкциями. Например, часто требуется, чтобы расход дутья $V_{\text{д}}$ поддерживался на постоянном и максимальном уровне (значение «норма»), и при необходимости снижения перепада давления в случае, например, повышенной проницаемости шихты расход дутья $V_{\text{д}}$ мог только уменьшаться.

Преимуществом рассматриваемого способа управления энерго-технологическим агрегатом – доменной печью является повышение оперативности управления доменной печью, обеспечение выдачи совета оператору в реальном времени и, как следствие, снижение расхода кокса и предотвращение расстройств и аварийных состояний хода доменных печей.

Отметим, что Институтом машиноведения УрО РАН (руководитель работ В.П. Чистов) в содружестве с Московским институтом стали и сплавов (Национальный исследовательский технологический университет-МИСиС) (руководитель работ А.Е. Пареньков) и Региональным Уральским отделением АИН (руководитель работ В. Г. Лисиенко) был разработан тренажер с использованием логической экспертной системы доменной печи, переданный ряду металлургических комбинатов и заводов, а также представлены основные технологические положения и вариант программной реализации экспертной логической системы [18.35; 18.112; 18.119; 18.131].

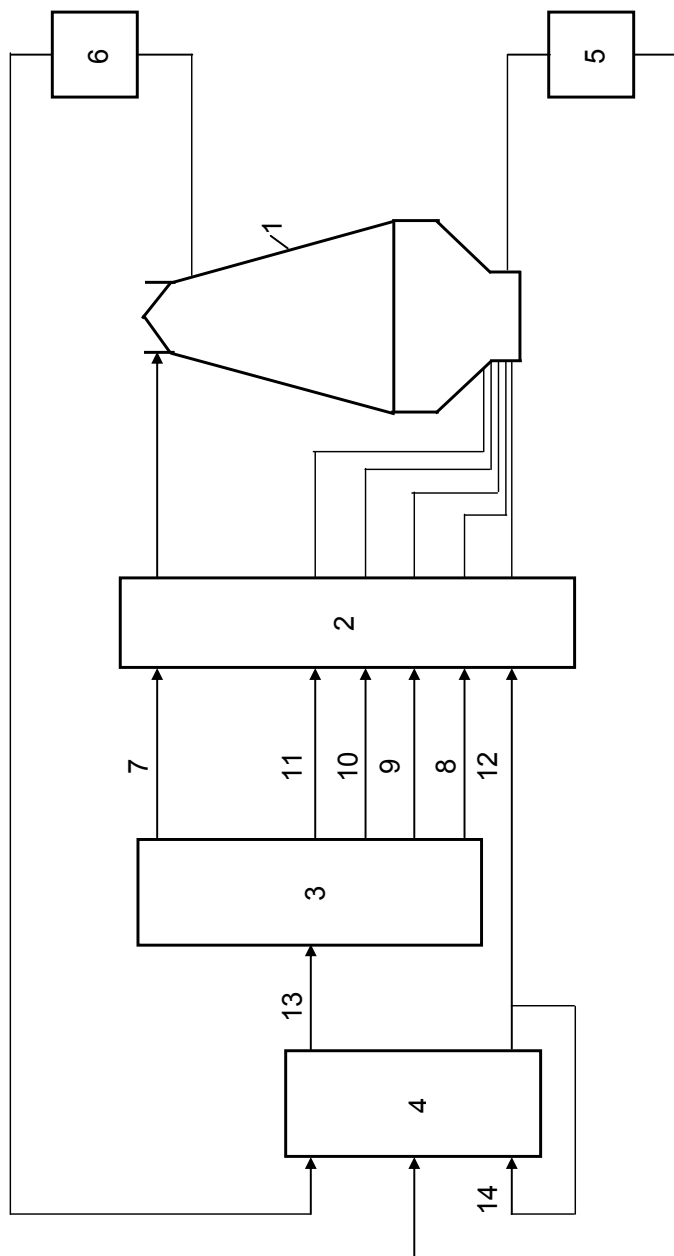


Рис. 18.40. Схема для упрощенного представления табл. 18.10 в виде табл. 18.11 и 18.12

Логическая модель и тренажер

Разрабатываемые варианты тренажера были основаны на рассмотренной выше логической модели доменной печи.

При этом, как отмечалось, экспертная система строится на основе поведенческой логической модели технологического процесса (ТП), использующей понятия *отклонения* наблюдаемых параметров от нормы. Предполагается, что нормальные значения наблюдаемых параметров определены «коридором» $X_i^0 \pm \Delta$ (рис. 18.41), в пределах которого X_i принимает значения «=» (равно).

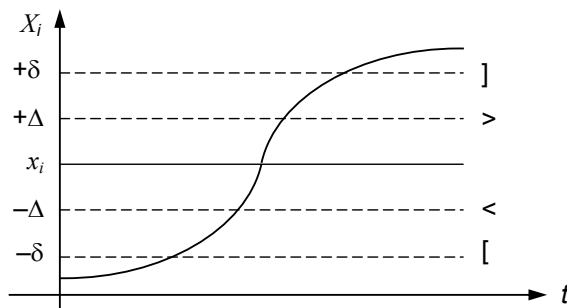


Рис. 18.41. Нечеткие значения параметров

За пределами этого коридора, если отклонение $\Delta < \delta$, X_i принимает значения «<» (меньше) и «>» (больше), если $\Delta > \delta$, далее соответственно «[» (много меньше) и «]» (много больше). Таким образом, все наблюдаемые параметры представляются в терминах пятизначной логики — «[», «<», «=», «>», «]».

Логическая модель технологического процесса представляет собой систему качественных зависимостей между параметрами X и U , где U — управляющие воздействия. По этой модели строится прогноз поведения ТП и рекомендации оператору по вмешательству в процесс с целью возврата его в нормальный режим эксплуатации (НРЭ).

В основу построения логической модели ТП положены технологические инструкции и накопленный опыт технологов-экспертов, формализуемые в базе знаний ЭС. Ими же определяются коридоры нормальных значений наблюдаемых параметров для различных режимов эксплуатации. Для включения в модель расчетных параметров к ней подключаются соответствующие технологические

программы, опирающиеся на данные системы сбора оперативной информации (СОИ).

При отклонении ТП от НРЭ в силу влияния «помех» ЭС формирует совет оператору в виде указаний, какие из «рулей» (управляющие воздействия) в каком направлении следует изменить (увеличить, уменьшить), одновременно формируя прогноз поведения ТП.

При этом экспертная система поддерживается рядом моделей (рис. 18.42).

На рис. 18.42 приняты следующие обозначения: T – температура горна; DP – перепад давления; RT – текущий расход газовой смеси; DE – приращение энергии; RN – рудная нагрузка; GS – расход газовой смеси; W – влажность дутья; TD – температура дутья.

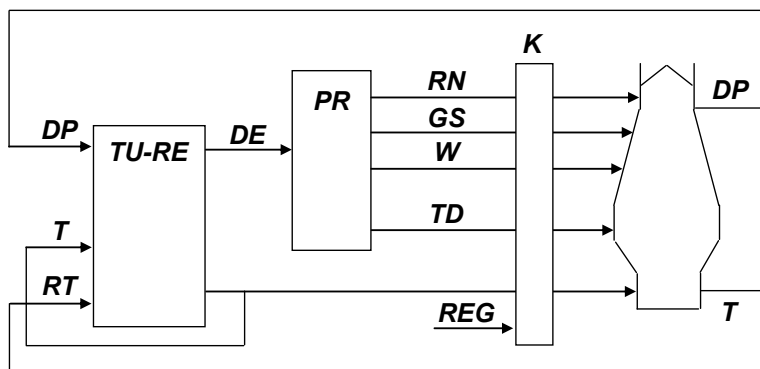


Рис. 18.42. Модель управления

В базе знаний блок управления описан в терминах пятизначной нечеткой логики («[», «<», «=», «>», «]»), кроме DE , для которой допустимы лишь значения «<», «=», «>».

В блоке $TU-RE$ параметры DP , T и расход в текущий момент RT определяют желаемые с точки зрения эксперта расход R и приращение энергии DE , вводимой в печь на очередном интервале управления. Блок PR устанавливает порядок подключения источников энергии, если DE имеет значение «>», и порядок их отключения, если DE имеет значение «<».

Для целей построения тренажера между системой управления и моделью доменной печи включен коммутатор K , позволяющий при $REG = 1$ вводить значения рулей с клавиатуры, а при $REG = 0$ под-

ключать систему управления, которая будет функционировать с текущего состояния.

Модель доменной печи. Модель доменной печи состоит из пяти компонент: энергетическая модель шихты, тепловая модель горна, модель каупера, модель перепадов давления, модель газораспределения.

Эти модели базируются на представлении содержимого печи (шихты) в виде столба последовательно сменяющихся сверху вниз слоев. Высота одного слоя, следовательно, и число слоев, определяется количеством материала, переплавляемого в чугун, за такт моделирования.

Под столбом шихты находится зона горения (горн), под которой накапливаются шлак и чугун. К горну подводится смесь вдуваемого воздуха, кислорода и природного газа. Энергетическое состояние нижнего слоя оказывает влияние на энергетическое состояние горна. Загрузка шихты осуществляется сверху через засыпной аппарат. В зависимости от системы загрузки (Кокс – Руда – Кокс – Руда, Кокс – Кокс – Руда – Руда и пр.) формируется газопроницаемость столба шихты в целом.

Энергетическая модель шихты. Энергетическая модель одного слоя определяется отклонением рудной нагрузки от нормы и суммирующейся с ней помехой на колошнике, которая может зависеть от влажности кокса, руды или других факторов. С задержкой, равной числу слоев, энергетическая составляющая последнего слоя поступает в тепловую модель горна.

Тепловая модель горна. В тепловой модели горна суммируется тепловая энергия нижнего слоя шихты с вдуваемой энергией. Повышение температуры дутья способствует ускорению реакций горения и, следовательно, увеличению температуры горна. В тепловой модели горна принято: увеличение расхода дутья и его влажности приводят к снижению энергии горна. Увеличение температуры дутья и вдувание газовой смеси приводят к увеличению энергии. С задержкой на один такт энергия отображается в температуру нагрева печи (горна).

Модель воздухонагревателя. Модель воздухонагревателя представлена таблицей зависимости результирующей температуры дутья от требуемой температуры дутья и температуры воздухонагревателя.

Модель перепада давления и скорости схода шихты. Доменная печь представляет собой противоточный реактор, в котором движение газового потока обеспечивается его избыточным давлением на входе снизу. Газовый поток пронизывает столб шихтовых материалов, находящихся в различных агрегатных состояниях.

Шихта имеет слоевую структуру, где чередуются газопроницаемые (коксовые) и газонепроницаемые (рудные) слои, геометрическими характеристиками которых можно управлять. Скорость схода шихты считается пропорциональной расходу дутья и обратно пропорциональной температуре горна.

Перепад давления определяется как произведение величины, обратной проницаемости шихты, и расхода дутья.

Модель газораспределения. Распределение газов в доменной печи существенно зависит от используемой системы загрузки, характера спуска и распределения материалов и пр. Распределение газовых потоков определяет значения относительных периферийных температур колошниковых газов. Отклонение температур колошниковых газов от нормы в модели имитируется принудительно при помощи введенной помехи.

Модель управляющего (экспертного) блока. Модель управляющего блока (см. рис. 18.42) создавалась на основе технологической инструкции, по которой были определены правила управления тепловым состоянием печи. Рассмотрены примеры таких правил:

1. Для повышения температуры горна T следует последовательно воспользоваться следующими «рулями» – температура дутья (TD), влажность дутья (W), расход газовой смеси (GS), рудная нагрузка (RN), начиная с еще не использованного и устанавливая их в положение, соответствующее увеличению подводимой энергии. Для понижения температуры горна следует использовать те же «рули», но в обратной последовательности.

2. Нельзя использовать более одного «руля» одновременно, а каждый «руль» может изменяться на одну позицию (от значения « \Rightarrow » к значениям « $>$ » или « $<$ », от значения « $>$ » к значению « \Rightarrow » и от значения « $<$ » к значению « \Rightarrow »).

Система управления ходом доменной печи представлена двумя не связанными между собой подсистемами, функционирование которых опирается на правила управления, полученные из технологической инструкции.

Это подсистемы управления тепловым состоянием печи *TU-RE* и газораспределением *PR*.

В свою очередь управление тепловым состоянием состоит из двух взаимосвязанных подсистем управления нагревом (температурой горна *T*) и перепадом давления (*DP*).

Особенности построения тренажера. При управлении таким сложным технологическим объектом, как доменная печь, оператор отслеживает состояние совокупности параметров, различные сочетания которых характеризуют множество возникающих ситуаций. При этом оператор руководствуется интуицией, осуществляя наработанные «правильные» стратегии, зафиксированные в технологических инструкциях. Элементом стандартной методологии обучения операторов правилам управления ТП и, соответственно, способам поддержания объекта в нормальном режиме функционирования в настоящее время становится *компьютерный тренажер* как один из наиболее эффективных и экономичных средств обучения и тестирования персонала, способствующий усвоению и закреплению навыков управления в нештатных ситуациях, снижению числа аварий и сбоев вследствие ошибок оператора.

Еще раз отметим особенность логической модели доменной печи, но уже применительно к тренажеру.

В тренажере - экспертной системе мастера доменной печи объектами имитации являются: 1) содержимое печи (шихта), представляемые в виде столба последовательно сменяющихся сверху вниз слоев; при этом высота одного слоя, следовательно, и число слоев, определяется количеством материала, переплавляемого в чугун, за такт моделирования; 2) зона горения (горн), которая находится под столбом шихты и под которой накапливаются шлак и чугун; к горну подводится смесь вдуваемого воздуха, кислорода и природного газа; энергетическое состояние нижнего слоя оказывает влияние на энергетическое состояние горна; 3) газопроницаемость столба шихты в целом, которая формируется в зависимости от системы загрузки (кокс – руда – кокс - руда, кокс – кокс – руда - руда и пр.), осуществляемой сверху через засыпной аппарат. В результате модель доменной печи в данном случае включает пять компонент: энергетическая модель шихты, тепловая модель горна, модель воздушонагревателя, модель перепадов давления, модель газораспределения. Для воссоздания производственной ситуации в данном логико-ди-

наимическом тренажере использовалась стратегическая поведенческая модель доменной печи, которая формируется на основании технологической инструкции, опыта работы и данных математического моделирования и представляется в виде таблиц соответствия выходных параметров и управляющих воздействий (см. табл. 18.10, 18.11 и 18.12). В результате персонал доменной печи получает возможность обучения способам управления доменной печью (регулированию входных параметров (управляющих воздействий) с целью приведения выходных параметров доменной печи к требуемым), что, в свою очередь, способствует усвоению и закреплению навыкой управления в режиме реального времени при возникновении нештатных ситуаций, снижению числа аварий и сбоев вследствие ошибок оператора, обеспечивает повышение оперативности управления доменной печью.

Первоначальный вариант тренажера, основанного на логических моделях, был разработан в Институте машиноведения (ИМАШ) УрО РАН под руководством В.П. Чистова [18.129]. В дальнейшем в его усовершенствовании и применении при испытаниях и эксплуатации участвовали УГТУ-УПИ (УрФУ) под руководством В.Г. Лисиенко и МИСиС (НИТУ-МИСиС) под руководством А.Е. Паренькова, Институте проблем управления РАН под руководством В.Д. Малюгина и Е.Б. Иванова [18.36; 18.120; 18.131].

Компьютерный тренажер состоит из моделирующей части, в основу которой положена экспертная система-советчик по управлению ходом доменной печи, и из графического интерфейса для визуализации процесса ведения объекта и управляющих параметров. При функционировании экспертной системы данные через СОИ поступают с датчиков, установленных на объекте, а в режиме тренажера значения параметров вводятся с клавиатуры компьютера (см. рис. 18.43).

При запуске тренажера подсистема визуального отображения модели формирует графический экран, который разбит на несколько разделов. Раздел «Помехи» и «Рули» позволяет вводить значения помех и управляющих параметров. Раздел «Имена» содержит перечень имен отображаемых переменных модели. Результаты работы тренажера выводятся во временной линейный протокол и динамический протокол на схематичном изображении доменной печи.

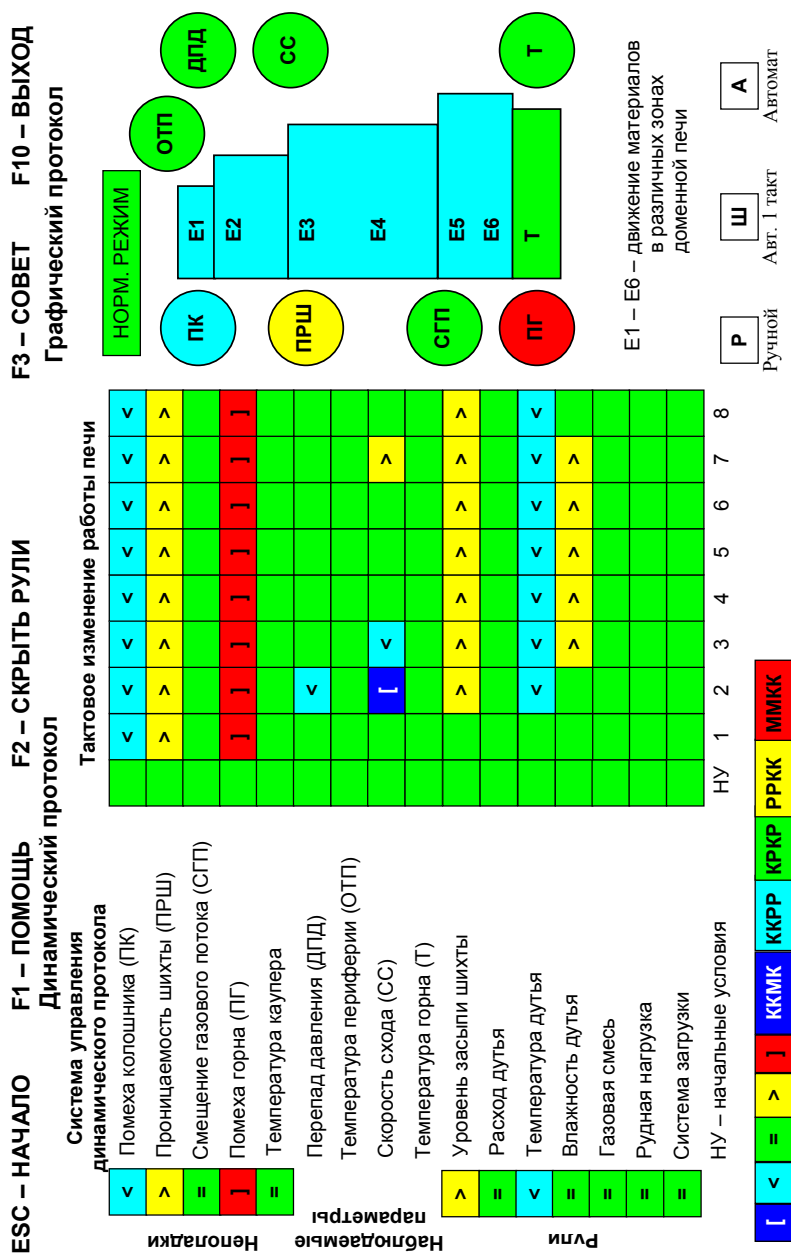


Рис. 18.43. Тренажер мастера доменной печи

Область линейного протокола состоит из частей: «История / Текущее состояние / Прогноз». В последовательности столбцов «История» показаны все пройденные к данному моменту состояния и управления к ним. В столбце «Текущее состояние» отображается состояние, к которому модель перешла в результате исполнения последнего шага управления. Столбцы временного протокола нумеруются снизу по шагам управления. Переменные различных типов – помехи, состояния и «рули» обозначаются цветами, соответствующими их значению.

В динамическом протоколе в графической фигуре схематичного изображения доменной печи наблюдаемым переменным отведены фиксированные области. Цвета этих областей зависят от значений соответствующих переменных. В процессе вывода «Истории» состояния обозначенных переменных изменяются синхронно с их изменением в линейном протоколе.

На графическом экране расположены три кнопки выбора режима управления: У, С и А.

Режим «У»: управление в пошаговом режиме. Позволяет задавать значения «помех» и рулей и наблюдать реакцию модели с остановкой после каждого шага управления. После исполнения очередного шага модель перейдет в новое, быть может, ненормальное состояние. После этого можно устанавливать значения рулей и выполнять следующий шаг.

Режим «С»: совет, как установить рули на данном шаге для вывода модели в норму. Работает аналогично режиму «У», но на каждом шаге высвечивает в столбце текущего состояния «правильные» значения рулей, т. е. рекомендуемое управление.

Режим «А»: автоматический перевод модели в норму. Из любого текущего состояния переводит параметры в норму за конечное число шагов при автоматически подобранном управлении.

Для целей обучения и тестирования персонала реализована *база сценариев обучения*. Сценарий – это определенная комбинация значений рулей при определенном состоянии модели. Для работы со сценариями на экране имеются две кнопки – «ЗАПИСЬ СЦЕНАРИЯ» и «ВЫБОР СЦЕНАРИЯ») – и область «НОМЕР СЦЕНАРИЯ» для ввода номера сценария, которые позволяют запоминать отработанные сценарии или выбирать их для быстрой установки требуемой комбинации рулевых параметров.

На рис. 18.43 и представлен графический интерфейс тренажера, состоящий из динамического и графического протоколов с «разоб-щенными» рулями и неполадками.

В данном случае представлен вариант работы печи с помехой на колошнике («<» - ниже нормы), проницаемостью («>» - выше нор-мы) и помехой в горне («J» - много выше нормы). Для предотвраще-ния аварийной ситуации в доменном процессе были использованы три управляющих воздействий: расходы и температура дутья, уро-вень засыпи шихты.

В нормальное состояние, определяемое перепадом давления, тем-пературой периферии, скоростью схода шихты и температурой горна, печь выходит из 8 тактов во времени. Данный тренажер был внедрен на Чусовском металлургическом заводе (ЧусМЗ), продемонстриро-ван и передан ряду других металлургических предприятий.

На фоне представлений об экспертной системе управления таким сложным объектом, как доменная печь, следует, конечно, подчеркнуть что, особенно в последнее время, как в России, так и за рубежом соз-давались и совершенствовались экспертные системы и тренажеры для управления различными сложными объектами, для которых непосред-ственное использование сложных математических моделей в реальном времени на данном этапе времени не представлялось возможным.

Основная задача подобных исследований заключалась в разра-ботке экспертной системы (тренажера) совершенного вида, способ-ного достаточно точно и понятно предоставить оператору варианты различных решений по правильному управлению процессом в сло-жившейся ситуации и предотвратить аварийную ситуацию. В этом плане представляет интерес обратиться к управлению таким слож-нейшим объектом, как космический корабль.

В основу управления космическим кораблем (см. рис. 18.44) положен расчет динамики $\left(\frac{d}{dt}(mV)\right)$ центра масс, что позволяет определить уровень отклонения ракеты-носителя от траектории движения и выве-сти её на нормальный уровень функционирования [18.130; 18.322]:

$$\frac{d}{dt}(mV) = \sum_i F_i; \quad \frac{d}{dt} X = V, \quad (18.108)$$

где X и V – соответственно радиус-вектор и вектор скорости центра масс; m - масса; F_i - некоторая сила в составе других сил.

При взлете космического корабля с Земли и других планет уравнение запуска летательного аппарата имеет вид:

$$\frac{d^2}{dt^2} \Xi = \sum_j \left\{ -2\xi_j \omega_j \frac{d}{dt} \Xi - \omega_j^2 \Xi + K_j \sum_i F_i \right\}, \quad (18.109)$$

где Ξ – вектор, состоящий из двух компонент $[\eta \zeta]^T$, представляющих проекции малого угла изгиба продольной оси OX ракеты-носителя на плоскости XOY и XOZ ; ξ_j, ω_j, K_j – параметры j -го тона упругих колебаний (соответственно декремент затуханий, собственная частота и коэффициент усиления перерезывающей силы); F_i – некоторая сила в составе других сил.

Уравнение посадки космического корабля на другие планеты можно выразить следующим образом [18.130; 18.323]:

$$y = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \left[(h \cdot (W_{\text{box}} - 1 - i) - y_{\text{гор}}) \cdot \frac{W_{\text{box}} / 2}{W_{\text{box}} / 2 - i} \right]}{n} + y_{\text{гор}}, \quad (18.110)$$

где $n > 0$; W_{box} – высота изображения; $y_{\text{гор}}$ – среднее положение линии горизонта на видеоизображении; h – высота точки полета.

При большой сложности управления космическим аппаратом в условиях невесомости и при недостаточной и нечеткой информации, конечно же, как и в доменной печи, существует опасность возникновения аварий и неполадок. В этом плане может быть полезно использование законов неравновесной термодинамики [18.50; 18.51]. При равенстве прихода и расхода энтропии процесс находится в стационарном рабочем режиме и маловероятны аварийные ситуации.

Использование законов неравновесной термодинамики позволяет определить степень самоорганизации процесса, т. е. выйти из условий нестабильной работы доменной печи к ровному протеканию процесса.

Развитие логической модели управления. Усовершенствование и оценка расширения возможностей логических моделей управления доменной печью предпринято Е.Б. Ивановым под руководством В.Д. Малюгина в Институте проблем управления. При этом консультации оказывали В.П. Чистов, А.Е. Пареньков и В. Г. Лисиенко [18.36; 18.131].

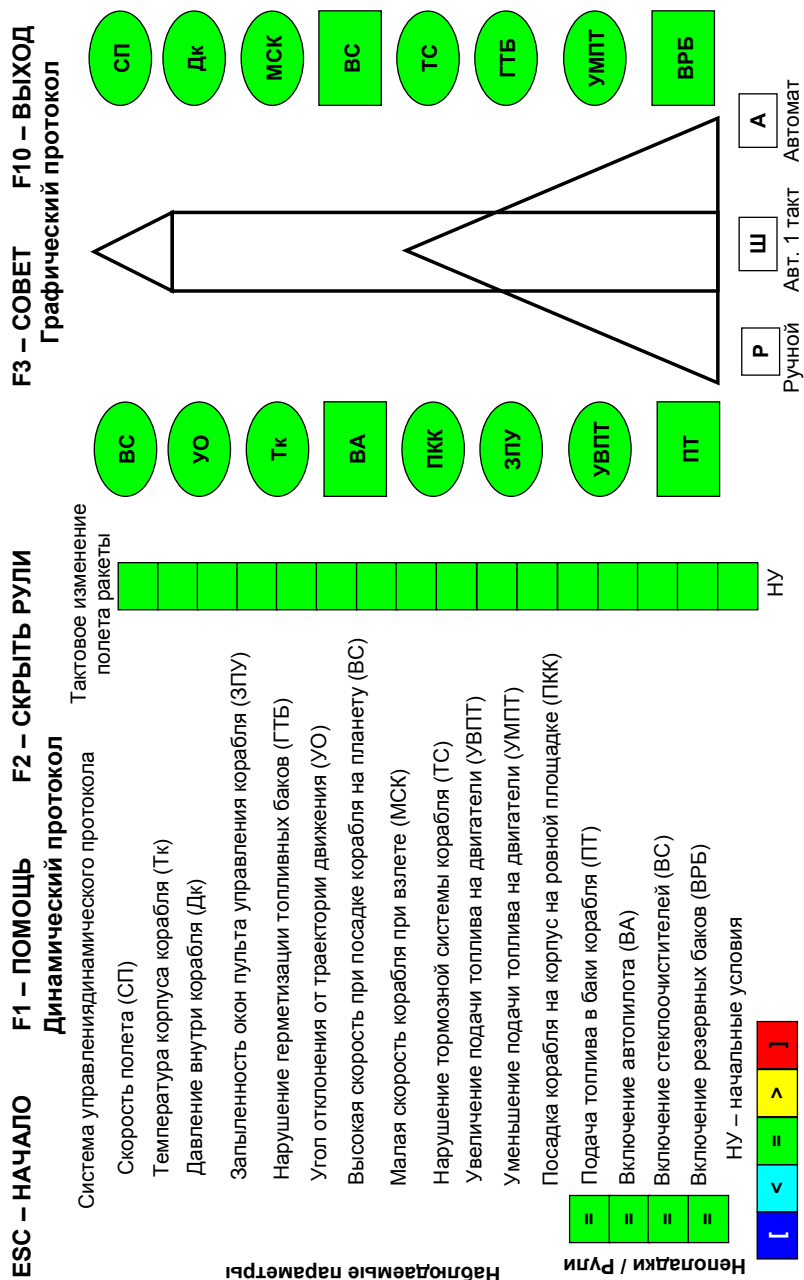


Рис. 18.44. Интерфейс тренажера старта и полета ракеты-носителя

В результате был разработан метод построения логической структуры принятия решений, используемый для создания модели по управлению доменным процессом. Метод основан на структурировании правил управления по исполнительным механизмам процесса, что позволяет сократить число ошибок при проектировании и упростить проверку правильности создания подобных схем. Предложено формальное описание технологических инструкций по управлению доменным процессом в виде набора секвенций (математические и логические выражения), представляющих правила управления объектом.

Как и в ранее разработанной модели тренажера дополнительно введены упрощенные логические связи между выходными и входными параметрами процесса путем выделения так называемых «продукционных правил», основанных на технологической инструкции. Выявлено и формализовано около ста таких правил.

Была разработана и обоснована структура связей между моделями (логическая, балансовая, технологическая, физико-химическая, аналитическая, экономическая, безопасности жизнедеятельности). Выявленная структура связей положена в основу комплексной логической модели экспертной системы доменного процесса.

На основе анализа технологических инструкций, последовательности набора секвенций (математические и логические выражения) и обоснованности структуры связей между моделями разработаны алгоритм получения уставок и алгоритм принятия решений по управлению доменным процессом, соответствующий данным уставкам.

Разработаны программное обеспечение и соответствующий пользовательский интерфейс комплексной логической модели поддержки принятия решений для оператора доменного процесса, реализующие информационную технологию и предоставляющие инструменты для работы оператора в режимах «тренажер» и «автомат».

Совершенствование функций эксперта-наблюдателя-технологов доменного процесса. Эти идеи с участием В. Г. Лисиенко высказывались и, в определенной степени, воплощались в практику Е.Л. Сухановым с коллегами [18.39; 18.181; 18.182].

Как отмечалось, для управления комплексом доменных печей большого объема используется более 3000 источников информации. Это позволяет автоматизировать все процессы шихтоподготов-

ки и загрузки печи, управлять работой блока воздухонагревателей, стабилизировать требуемые параметры комбинированного дутья и давление на колошнике печи. Применение системы *scada* позволило сменным технологам (мастеру печи, его помощнику, газовщику и горновым) оценивать не только текущее состояние процесса, но и его развитие во времени с использованием трендов контролируемых переменных.

Дальнейшее совершенствование АСУ ТП базируется на разработке интеллектуального уровня системы, основанного на применении математических моделей и экспертных систем, что позволит уточнить закономерности современного доменного процесса, скорректировать действующие технологические инструкции и решать задачи оптимизации аглодоменного производства.

Необходимо заметить, что существующие способы оперативного управления ходом доменной плавки, зафиксированные в технологических инструкциях, во многом основаны на использовании результатов визуальных наблюдений сменных технологов за работой отдельных фурм, процессами выпуска чугуна и шлака, изменения характера трендов многих переменных.

Чтобы наилучшим способом использовать при управлении доменным процессом существующие технологические инструкции и советы экспертов, целесообразно иметь в базе данных АСУ ТП сведения о результатах визуальных наблюдений сменных технологов о ходе плавки.

Для решения рассматриваемой проблемы предложен следующий способ получения необходимой информации, пригодный для обработки с помощью персональных компьютеров.

1. Применение метода шкалирования анализируемых величин по заданным условиям их отклонений от «нормы», которая характеризует устойчивую и эффективную работу доменной печи.

2. Чтобы упростить решение задачи, предлагается использовать десятибальную шкалу для оценки степени отклонения анализируемой величины от «нормы», которой присваивается цифра «5». Например, в этом случае разогрев печи или повышение интенсивности работы фурмы будет оцениваться цифрами «6-10», а похолодание печи или ухудшение работы фурм оценивается цифрами «4-0».

3. Задачи цифровой идентификации могут решаться с использованием таблиц, в которых оговорены условия оценки отклонений

от «нормы» отдельных анализируемых величин (см., например, табл. 18.10).

4. Сравнительно простая задача цифровой идентификации результатов визуальных наблюдений может осуществляться одним из сменных технологов, который в этом случае будет выполнять функции эксперта-наблюдателя. Результаты идентификации вводятся в базу данных системы с использованием переносного устройства передачи информации.

Предлагаемый способ цифровой идентификации отклонений от «нормы» основных переменных доменного процесса позволяет решать важные задачи управления - диагностирование аварийных и штатных ситуаций, возникающих при ведении плавки.

Если судить по действующим технологическим инструкциям, то может рассматриваться по крайней мере до 12 возможных штатных ситуаций (например, «периферийный ход газов», «нижнее подвешивание шихты при разогреве печи» и т. п.). Условия идентификации таких ситуаций оговариваются определенными отклонениями от «нормы» около 30 анализируемых показателей хода плавки. Такая задача решается с использованием логической программы и требует также участия экспертов на этапах разработки интеллектуального блока АСУ ТП.

Таким образом, особенность так называемого ситуационного принципа, позволяющего поддерживать «нормальный» режим работы печи заключается в выявлении и коррекции не отдельных показателей плавки, а характерных отклонениях всего режима (производственных ситуаций), которых на различных печах насчитывается от 8 до 10. Мероприятия для коррекции таких ситуаций определены опытными технологами в технологических инструкциях, которыми пользуются операторы печи. Среди этих ситуаций можно отметить:

- периферийный ход печи;
- осевой ход печи;
- канальный ход печи;
- ход печи с перекосом уровня засыпи шихты;
- холодный ход;
- горячий ход;
- тугой ход;
- подвешивание шихты;
- загромождение горна.

При реализации этого принципа на основании технологической инструкции с помощью специальных языков программирования создается база знаний, а все данные, поступающие с КИП и в результате визуальных наблюдений, а также характерные тренды показателей приборов при развитии разных технологических ситуаций, формируют базу данных. Такая система, где опыт технологов реализован в виде базы знаний, будет относиться к экспертной.

Проблему получения и анализа информации АСУ предлагается решать следующим образом.

Визуальную информацию, полученную технологом, предлагается вводить в базу данных в виде буквенно-цифровых индексов, заранее определенных для каждого результата наблюдения и записанных в виде шкал понятий.

Пример такой шкалы для результатов наблюдения фурм показан в табл. 18.13.

Таблица 18.13

Шкала понятий, предназначенная для идентификации принятых вариантов отклонений от «нормы» показателей работы фурм, определяемых визуально

Шкала	Признаки идентификации принятых дискретных вариантов отклонений от «нормы» показателей работы фурм, определяемых визуально
0	Часть фурм перекрыта гарнисажем и не работают
1	На фурмах появляются куски нерасплавленных материалов
2	Фурмы работают «вяло», циркуляция кусков кокса уменьшается
3	Фурмы работают «вяло» и неравномерно
4	Фурмы работают интенсивно, но холодно
5	Фурмы работают интенсивно, ярко и равномерно
6	Фурмы работают интенсивно с периодическим появлением кусков нерасплавленных материалов

Предлагаемый способ сбора и анализа информации о работе печи позволяет «ситуационно» использовать верхний уровень АСУ ТП для решения задач оперативного управления режимом доменной плавки.

Базовые подходы и учет неконтролируемых возмущений

Как отмечалось, традиционные методы анализа работы доменных печей, основанные на пофакторном учете влияния изменения

режимных параметров на производительность печи и удельный расход кокса, постепенно заменяются более прогрессивными компьютерными технологиями. В основу этих технологий положены фундаментальные закономерности доменного процесса, что позволяет не только получать количественные оценки изменения основных показателей работы печи, но и выявлять те особенности развития физико-химических явлений плавки, которые способствуют снижению энергетических затрат и повышению производительности.

Необходимо еще раз отметить основополагающую роль теории теплообмена в слое, разработанную научной школой под руководством Б.И. Китаева, для создания научных основ модельного подхода к анализу работы доменных печей [18.67; 18.68; 18.96; 18.133-18.136].

Совершенствование методов анализа и управления работой доменных печей осуществляется последователями этой школы с участием В. Г. Лисиенко (Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Н.А. Спирин, С.А. Загайнов, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров, А.Н. Дмитриев, В.Ю. Рыболовлев, О.П. Онорин, Ю.О. Раев и др.).

Модели, ориентированные на использование реально контролируемой информации, основаны на балансовых уравнениях и эмпирических зависимостях. Примером таких моделей является модель УГТУ-УПИ (УрФУ). Задача выявления «предельных состояний» решена путем использования разработанных методик и алгоритмов. Новизна подхода определяется тем, что учитываются взаимосвязи между тепловым состоянием, шлаковым режимом и газодинамикой как для верхней, так и для нижней зон печи. Для математического описания этих взаимосвязей используются модели, построенные на материальных и тепловых балансах, общепризнанные и проверенные временем закономерности процессов шлакообразования и газодинамики, а также эмпирические соотношения. Адекватность модели проверялась по практическим данным о работе доменных печей как в процессе нормального хода плавки, так и в периоды, характеризующиеся целенаправленным или вынужденным изменением режимных параметров.

Задача анализа влияния неконтролируемых возмущений на показатели работы печей является актуальной. Практика управления доменным процессом нацелена на реализацию такого режима плавки, при котором эффекты неконтролируемых возмущений не могут привести к расстройствам ее хода, т. е. создаются условия для компенсации эффектов неконтролируемых возмущений за счет «перерасхода»

кокса. Подход к оценке величины резерва, необходимого для компенсации таких возмущений, базируется на анализе взаимосвязи средне-квадратичного отклонения содержания кремния в чугуне и удельного расхода кокса. Эта зависимость может оцениваться как с использованием эмпирических соотношений, так и на основе моделирования.

Подход, разработанный в УГТУ-УПИ (УрФУ), к оценке влияния возмущений на эффективность того или иного мероприятия ориентирован на анализ динамики переходных процессов в системах управления. Для решения конкретных задач используется:

- математический аппарат анализа систем, находящихся под воздействием случайных возмущений;
- методы моделирования переходных процессов в системах управления;
- методы теории тепло- и массообмена в доменной печи, что позволяет описать зависимости между режимными параметрами плавки и динамическими характеристиками процесса.

Было принято, что величина материальных и энергетических потерь пропорциональна колебаниям содержания кремния в чугуне, а суммарный удельный расход кокса определяется по правилу аддитивности, т. е. $\Delta K_{\Sigma} = \Delta K_X + \Delta K_Z$, где ΔK_X – изменение удельного расхода кокса за счет изменения технологических параметров плавки, кг/т; ΔK_Z – удельный расход кокса, обеспечивающий запас тепла, необходимый для компенсации неконтролируемых возмущений.

Задача оценки ΔK_X успешно решается в рамках модели статики теплового состояния доменной печи. Для определения ΔK_Z используются подходы статистической динамики и методы моделирования переходных процессов. Изменение динамических характеристик процесса при изменении режимных параметров плавки определяется на основе решения задачи теплообмена. Переходные процессы теплового состояния аппроксимируются уравнением инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Для расчета изменения амплитуды колебаний содержания кремния в чугуне получено следующее выражение

$$\frac{\Delta[\text{Si}]_{\text{MAX}}^*}{\Delta[\text{Si}]_{\text{MAX}}^{\bar{}}} = \frac{K_{\text{об}}^*}{K_{\text{об}}^{\bar{}}} \sqrt{\frac{T_{\text{об}}^{\bar{}}}{T_{\text{об}}^*}}, \quad (18.111)$$

где $K_{\text{об}}^{\bar{}}$, $T_{\text{об}}^{\bar{}}$, $K_{\text{об}}^*$ и $T_{\text{об}}^*$ – коэффициент передачи и постоянная объекта в базовом и прогнозном периодах соответственно.

Разработанная методика позволяет в значительной степени учитывать изменение условий плавки на потери, связанные с действием неконтролируемых возмущений.

Правомерность использования данной методики подтверждалась, например, производственными данными, полученными при анализе работы доменной печи ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова». Рассматривались два периода длительностью по 15 суток: работа печи с содержанием железа 52-53 % и работа печи с содержанием железа в шихте 56-58 %. В рассмотренных случаях среднеквадратичное отклонение содержания железа в шихте составляло 0,5 %. При работе печи с содержанием железа в шихте 52-53 % среднеквадратичное отклонение содержания кремния в чугуне составляло 0,06 %, а при работе печи с повышенным содержанием железа среднеквадратичное отклонение составляло 0,09 %. Рассчитанное по разработанной методике отношение среднеквадратичных отклонений в базовом и прогнозном периодах составляет 1,35, т. е. действительно повышение содержания железа в шихте приводит к повышению колеблемости содержания кремния в чугуне.

Оценка требуемого запаса тепла только по диапазону колебаний кремния в чугуне не всегда является достаточной. При изменении состава пустой породы могут наблюдаться существенные колебания характеристик шлака на всем интервале процессов шлакообразования. Для учета влияния колебаний состава пустой породы на ход процессов доменной плавки разработана новая методика, которая позволяет учитывать:

- влияние температурного интервала зоны вязкопластического состояния;
- высоты области фильтрации расплава и вязкости шлака при температуре выпуска продуктов плавки на требуемый запас теплоты.

Установлено, что оценки, полученные на основе учета колебаний содержания кремния в чугуне, могут отличаться от оценок, полученных на основе анализа процессов шлакообразования в 1,5-2 раза. Пример результата расчетов требуемого запаса теплоты, приведенного к удельному расходу кокса, показан в табл. 18.14.

Таблица 18.14

Требуемый резерв кокса

Условия расчета требуемого резерва кокса при колебаниях состава агломерата	Величина требуемого резерва кокса, кг/т чугуна
Содержание кремния в чугуне, не менее допустимого (0,6 %)	6
Вязкость шлака на выпуске, не более чем средняя за анализируемый период	11
Высота зоны свободной фильтрации расплава, не менее чем средняя за анализируемый период	16

Разрабатываемая методика компенсационного эффекта позволяет повысить прогнозность оценки при наличии возмущений в работе доменной печи.

Логическая экспертная система ПЖВ (процессы жидкофазного восстановления)

Логическая экспертная система и соответствующий тренажер процесса ПЖВ и, в частности, агрегата РОМЕЛТ создавались в совместных работах УрФУ, НИТУ-МИСИС и РУО АИН им. А.М. Прохорова под руководством В.П. Чистова при активном участии А.Е. Паренькова, Ф.Л. Скуридина и В. Г. Лисиенко [18.141; 18.142].

Напомним, что, как и в случае доменного процесса экспертная система и тренажер были построены на основе поведенческой логической модели объекта, используются понятия отклонения наблюдаемых параметров от нормы. Предполагается, что нормальные значения наблюдаемых параметров определены интервалом $X_i^0 \pm \Delta$, в пределах которого X_i принимает значение « \Rightarrow » (равно). За пределами этого интервала определены интервалы «больше нормы» (>), «много больше нормы» (]), «меньше» (<), и «много меньше» ([). Таким образом, все наблюдаемые параметры «логизируются» в терминах пятизначной логики – « [», «<», « = », « > », «] ».

В качестве стратегической логической модели объекта управления использован табличный метод, разработанный В. Г. Лисиенко с коллегами (см. табл. 18 10 на примере доменной печи).

В основу тренажера процесса ПЖВ была положена качественная модель с использованием нечетких логических значений. Как

известно, нечеткая логика применяется при использовании нечеткой и размытой информации. Графическая оболочка тренажера написана на языке программирования «C++». Она обеспечивает интерактивное взаимодействие мастера с моделью печи.

Он был предназначен для обучения методами управления процессом РОМЕЛТ для условий Индии и ЮУНК (г. Орск). Может быть также полезен при работе сооружаемого агрегата РОМЕЛТ в республике Мьянма.

Таким образом, в основу построения тренажера положен логический подход к моделированию процессов, происходящих в печи. Тренажер состоит из базы знаний и графической оболочки (интерфейса).

База знаний представляет собой набор формализованных правил эксплуатации печи, взятых, в частности, из технологических инструкций по переработке шламов процессом РОМЕЛТ на проектируемом металлургическом заводе NMDC (Индия).

Графическая оболочка написана на языке C++ и скомпилирована в компиляторе Borland C++ 4.5. Она обеспечивает взаимодействие пользователя (обучаемого) и базы знаний.

Процесс РОМЕЛТ характеризуется большим числом наблюдаемых и управляющих параметров [18.111].

Процессы жидкофазного восстановления, протекающие в печи ПЖВ, отличаются большими скоростями, что требовало особых подходов к управлению такими процессами. Советчик мастера в этом случае представляется необходимым элементом управления процессом, в том числе для предотвращения возможных резких отклонений от нормального режима и возникновения аварийных ситуаций.

Теоретические положения и опыт работы агрегата ПЖВ позволили подойти к формулированию основных положений логической модели, определить входные и выходные параметры, построить ее элементы (блоки) и скомпоновать сводную модель.

В соответствии с требованиями конструктора ЭС была сформирована модель объекта управления (см. рис. 18.45).

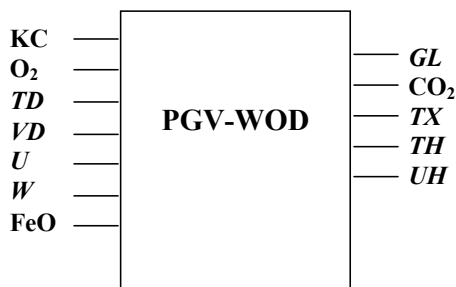


Рис. 18.45. Модель объекта управления ПЖВ и её компоненты

Агрегат характеризуется следующими входными (управляющими) параметрами:

U – количество загружаемого угля;

VD – количество вдуваемого воздуха;

TD – температура дутья;

W – количество влаги, вводимой в дутье;

FeO – количество оксида железа;

O_2 – количество кислорода, вдуваемого в рабочее пространство;

KC – количество кальция для поддержания необходимой основности шлака и наведения гарнисажа на холодильниках;

Выходными (наблюдаемыми) параметрами являются:

UH – уровень шлака;

TH – температура шлака;

TX – температура холодильников;

CO_2 – содержание CO_2 в колошниковом газе;

GL – высота барботажного слоя.

Нормальный ход ПЖВ связан с поддержанием наблюдаемых параметров в норме за счет изменения входных, в первую очередь величин U , VD , FeO , O_2 и KC , а затем TD и W .

Один из вариантов структуры системы управления представлен на рис. 18.46, на котором выделены входные параметры и соответствующие регуляторы. При этом возможны различные упрощения, например, на вход параметра W подается константа « $=$ » (норма), а параметр CO_2 может не входить в контур управления.

Между управляющими действиями VD , U и W устанавливается иерархия, т. е. регулирование TH в первую очередь осуществляется за счет изменения VD , затем U и, наконец, W .

Могут предусматриваться и другие варианты иерархии управления.

Подчеркнем, что основными параметрами, определяющими состояние шлаковой ванны и протекание процесса жидкофазного восстановления, являются содержание в шлаке FeO , углерода и температура шлака. Их прямое непрерывное измерение в настоящее время затруднено. Поэтому в логической модели процесса Ромелт поведение этих основных параметров было логически связано с изменением косвенных параметров (состав и температура отходящих газов, температура охлаждающей воды по высоте печи и др.).

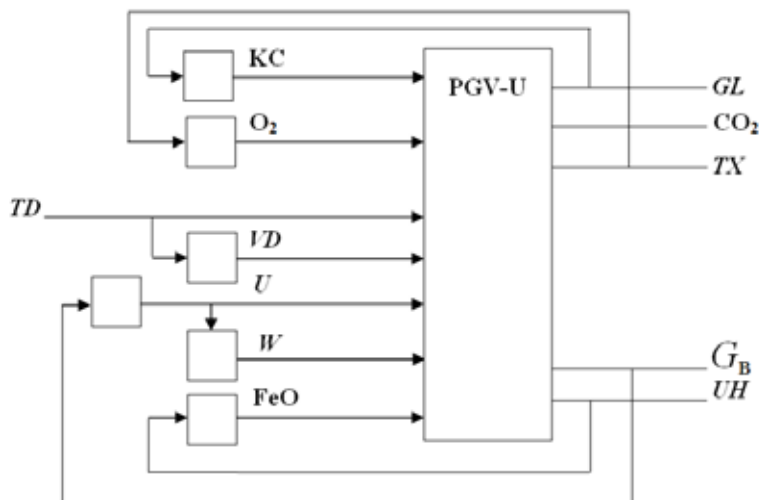


Рис. 18.46. Возможная структура системы управления ПЖВ

В тренажере реализована также логическая модель процесса РОМЕЛТ по технологическим нарушениям нормального хода процесса и ликвидации аварийных ситуаций. Принято, что ход плавки может нарушаться из-за отклонения управляющих параметров от заданных нормальных значений.

На тренажере выделяются наблюдаемые и управляющие параметры. Управляющие параметры позволяют оказывать воздействие на наблюдаемые параметры. Использовалось около 30 наблюдаемых параметров, например, температура охлаждающей воды на сливах из кессонов и содержание CO и H_2 в газе и 10 управляющих параметров. В их число входят такие важные параметры, как расходы угля

и шлама, содержание кислорода в нижнем дутье. Все эти параметры были сведены в таблицу. Наиболее важные входные и выходные параметры представлены на рис. 18.45 и 18.46.

При моделировании были приняты следующие основные нарушения технологического процесса:

- недостаток угля в шлаковой ванне;
- избыток угля в шлаковой ванне;
- разогрев шлаковой ванны;
- охлаждение шлаковой ванны;
- повышение температуры воды на сливах из кессонов;
- наличие CO и H_2 в отходящих газах после котла-утилизатора;
- повышение температуры газа перед газоочисткой свыше 220 °С.

Тренажер – советчик мастера для управления газификатором ПЖВ состоит из газификатора ПЖВ и регуляторов. В логическую модель ГФ-ПЖВ входят следующие подмодели: модель высоты шлака в ванне, модель содержания FeO в шлаке. Регулирование производится подачей кислорода на нижний и верхний ряд фурм, загрузкой шихты (уголь и флюс) и подачей охладителя (руда). Модель ГФ-ПЖВ представляет собой иерархическую структуру логических таблиц, заполненных экспертными формализованными правилами. Например, модель содержания FeO в шлаке имеет вид (X – норма; 0 – меньше нормы; 1 – больше нормы):

Руда 0 X 1 0 X 1 0 X 1

Тшл 0 0 0 X X X 1 1 1

FeO X 1 1 0 X 0 0 X

Видно, что содержание FeO в шлаке зависит от количества охладителя и температуры шлака. Данные таблицы легко совершенствуются дополнением новых правил (знаний), что делает модель гибкой и адаптируемой к любым условиям процесса газификации.

Тренажеры предназначены в основном для обучения персонала при управлении процессами и являются основой дальнейшего развития экспертной системы управления.

Создание тренажеров мастера доменной печи и агрегата РОМЕЛТ являлся первым этапом на пути разработки управляющих экспертных систем этих чугуныплавляющих процессов.

На данном этапе тренажеры могут использоваться для обучения технологического персонала методами управления соответству-

ющими агрегатами. Дальнейшим развитием данной логической модели могла бы быть разработка логико-количественной модели экспертной системы управления по примеру соответствующей системы, разработанной для управления доменной печью.

Проблема резкого снижения расхода дефицитного кокса в доменной плавке может быть решена путем использования горячих восстановительных газов (ГВГ). Был предложен и апробирован способ получения ГВГ в жидкой шлаковой ванне агрегата ПЖВ. При этом могут быть использованы любые виды угля и других углеродсодержащих материалов любой крупности. В случае использования кислорода для процесса газификации содержание азота в ГВГ резко снижается. Применение нагретого дутья (регенеративный, плазменный нагрев) позволяет существенно снизить расход угля и кислорода. Работа агрегата ПЖВ в режиме газификации была испытана на опытно-промышленной установке. При этом производительность по ГВГ (с температурой газа 1300 °С) достигала 30 тыс. м³/ч. При использовании ГВГ в доменной печи коэффициент замены кокса составляет 0,2-0,3 кг/м³ газа, расход кокса снижается на 20-30 % и составляет 380 кг/т чугуна и менее.

Возможен и смешанный режим работы газификатора ПЖВ с одновременным получением чугуна, в том числе и легированного, при добавлении в шихту до 10-20 % металлосодержащих материалов (неподготовленные руды, шламы, другие виды отходов).

Например, применение газификатора ПЖВ (ГФ-ПЖВ) может быть использовано в процессе ЛП-В с получением легированной ванадием стали или в доменном процессе при вдувании горячих восстановительных газов [18.2].

Апробация данного режима была проведена МИСиС (НИТУ-МИСиС) на опытной установке ПЖВ (табл. 18.14, а) [18.143].

Получение ГВГ и вдувание его в доменную печь представляют собой сложные технологические процессы, управление которыми существенно улучшается при использовании экспертных систем. Была разработана и применялась (в режиме тренажера) экспертная система с использованием конструктора экспертных систем промышленных технологий «Экспромт» [18.111; 18.142].

Таблица 18.14, а

ПОКАЗАТЕЛЬ	Вариант плавки			
	1	2	3	4
Расход угля, т/ч	12	11	12	14
Расход дутья на нижние фурмы, м ³ /ч	10400	7500	10000	11500
Содержание кислорода в дутье на нижние фурмы, %	64	60	52	64
Выход металла, т/ч	0,01	0,113	0,21	1,2
Выход шлака, т/ч	1,24	2,96	1,2	1,09
Состав газа: Н ₂ O	1,0	0,9	1,1	1,0
CO ₂	1,3	1,0	1,4	1,1
CO	52,0	68,0	50,2	59,7
H ₂	36,3	19,0	28,9	27,8
N ₂	9,4	11,1	18,4	10,4
Запыленность газов, г/м ³	12	15	12,7	13,5
Выход газа, м ³ /ч	26000	24400	23000	29500
Время работы, ч	1,5	6	1	0,5

18.5.4. Количественные модели экспертной системы доменной печи

В качестве первого шага для построения количественных моделей для управления доменным процессом предложено использовать теорию и модели теплового состояния доменной печи [18.36] в разработке научной школы Б.И. Китаева. Как известно, в рамках этой теории проводится зональный анализ теплового состояния доменной печи автономно для «верха» – верхней зоны – шахты и «низа» – нижней зоны – горна доменной печи* [18.67; 18.68; 18.133–18.139]. В дальнейшем могут быть использованы также более детализированные модели доменного процесса, такие, например, как модели ВНИИМТ [18.131; 18.144], балансовая логико-статистическая модель Института металлургии УрО РАН [18.101–18.105], модель УГТУ – УПИ (УрФУ) [18.145; 18.146].

Дискретные модели

При этом в соответствии с принятым в ЛКЭС основным постулатом «отклонения от нормы» и с учетом требований техноло-

* В дальнейшем условно применяются термины «верх» и «низ» доменной печи.

гической инструкции количественные модели предложено также использовать в дискретной форме – в виде отклонений, но уже не только в виде качественных («больше», «меньше»), но и в виде количественных соотношений.

Это предложение соответствует так называемому «принципу опорно-возмущенного движения», предложенного одним из создателей теории управления А.М. Ляпуновым. Под опорным движением, или состоянием, можно понимать нормальный режим плавки, соответствующий технологической инструкции, для оценки которого пригодны балансовые и другие статические модели. Возмущенный режим характеризует «отклонения от нормы», для его описания используются методы математического моделирования в данном случае в виде «количественных» моделей (в отличие от «логических» моделей). Эти «количественные» модели и положены в основу ЛКЭС [18.36; 18.39; 18.147–18.156].

На первом этапе предлагается построить количественные модели управления с компенсацией по возмущению (инвариантная система) и по отклонению с определением количественных отклонений параметров состояния и управляющих воздействий от «нормы» в виде конечно-разностных – дискретных значений соответственно Δu_i и Δx_j . Естественно, что на первом шаге будут использоваться квазистатические соотношения, а динамические переходные процессы могут составлять предмет соответствующего совета в виде предсказаний времени переходного процесса, времени запаздывания и постоянной времени $\tau_{\text{зап}}$ и T – соответственно.

В частности, для низа печи управляющие воздействия часто принимаются как «быстрые», в то время как для воздействий сверху дается определение «медленных» со временем запаздывания $\tau_{\text{зап}} = 5\text{--}6$ ч и постоянными времени в пределах $T = 6\text{--}12$ ч.

Количественные модели с компенсацией по возмущению нами предлагается использовать в двух вариантах – в виде модели эквивалентного сохранения и модели критерияльного отклонения.

Модель эквивалентного сохранения включает отклонения от нормы управляющих воздействий, которые обеспечивают сохранение уровня важнейших критериев теплового состояния для верха и низа печи. Такими критериями приняты индексы верха i_v и низа i_n доменной печи.

В качестве количественного показателя теплового состояния верхней зоны теплообмена (шахты) доменной печи в рамках школы Б.И. Китаева используется расчетная величина – индекс температурного поля верхней зоны печи i_B , определяемый как отношение средней температуры по массе шихтовых материалов в этой зоне $t_{ш}$ к температуре на границе раздела верхней и нижней зоны $t_{ш0}$

$$i_B = t_{ш} / t_{ш0} = \frac{1}{t_{ш0} \cdot H_B} \cdot \int_0^{H_B} t_{ш}(h) dh, \quad (18.112)$$

где H_B – средняя высота верхней тепловой зоны, м;

$t_{ш}(h)$ – изменение температуры шихтовых материалов по высоте печи, °C;

h – текущая высота верхней зоны доменной печи, м.

С использованием закономерностей противоточного теплообмена в плотном слое выражение i_B через параметры текущего контроля хода доменного процесса принимает вид:

$$i_B = \frac{t_k - mt_{ш} - \frac{1}{B}(t_k - t_{ш})[1 - \exp(-B)]}{t_k - mt_{ш} - (t_k - t_{ш})\exp(-B)}, \quad (18.113)$$

где t_k – средняя температура колошникового газа в общем газоотводе, °C;

$t_{ш}$ – средняя температура загружаемых в печь шихтовых материалов, °C;

m – среднее для верхней зоны печи отношение теплоемкостей потоков шихты и газа, равное $m = 0,5(1 + W_{ш} / W_r)$, доли ед.;

$W_{ш}$ – теплоемкость потока шихты на колошнике доменной печи, Вт/К;

W_r – теплоемкость потока газа на колошнике доменной печи, Вт/К;

B – показатель интенсивности теплообмена в верхней части печи, $B = \frac{\alpha_V \cdot S \cdot H_B}{m \cdot W_r} (1 - m)$, доли ед.;

α_V – средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа, Вт/(м³·К);

S – средняя площадь сечения шахты, м².

Из формул (18.112) и (18.113) следует, что основой изменения теплового состояния верха доменной печи являются теплоемкости потоков шихты и газов и их соотношение $m = W_{\text{ш}} / W_{\text{г}}$. При этом температура колошника $t_{\text{к}}$ может считаться основополагающим параметром теплового состояния верха доменной печи как величина, в основном определяемая соотношением m , которое и предложено использовать в качестве лимитирующего критерия, в частности, для определения такого важного параметра, как эквивалент замены кокса природным газом или другим видом дополнительного топлива. При этом предложено учитывать изменение степени прямого восстановления в условиях работы на комбинированном дутье. Принималось также, что степень прямого восстановления пропорциональна общему количеству углерода кокса, расходуемого на прямое восстановление железа $C_{\text{д}}$, газифицируемого на фурмах $C_{\text{ф}}$, т. е. по условию

$$\frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{ф}} + C_{\text{д}}} = \text{const.}$$

Было принято, что для стабилизации теплового режима верха печи необходимо иметь соотношение

$$\Delta W_{\text{ш}} / \Delta W_{\text{г}} = a = \text{const.} \quad (18.114)$$

Тепловое состояние низа печи предложено определять из уравнения теплового баланса нижней ступени теплообмена, составляемого в виде суммы теплот чугуна $Q_{\text{чуг}}$, шлака $Q_{\text{шл}}$ и теплоты на восстановление Si, Mn и P ($Q_{\text{Si, Mn, P}}$) за вычетом теплоты образования шлака $Q_{\text{о.шл}}$. В этом случае оптимальные затраты теплоты $Q_{\text{опт}}$, требуемые для выплавки чугуна заданного состава, определяются уравнением

$$Q_{\text{опт}} = Q_{\text{чуг}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{Si, Mn, P}} - Q_{\text{о.шл}}. \quad (18.115)$$

Используя составляющие теплового баланса, в которые входят непрерывно контролируемые параметры, получаем выражение для фактических затрат теплоты в нижней зоне печи $Q_{\text{г}}$

$$Q_H = Q_C + Q_D + Q_{X.K} + Q_{X.D} + Q_G - \\ - Q_{\text{РАЗЛ.ВЛ}} - Q_{\text{ПР.ВОССТ}} - Q_{\text{РАЗЛ.ГОР}} - Q_{\text{ВОССТ.ВОД}} - Q_{\text{УХ}} - Q_{\text{ПОТ}}, \quad (18.116)$$

где Q_C – энтальпия углерода кокса на входе в нижнюю зону при температуре t_0 ;

Q_D – энтальпия влажного дутья;

$Q_{X.K}$ – химическое тепло углерода кокса при горении до оксида углерода;

$Q_{X.D}$ – химическое тепло углерода топлива, вдуваемого в печь, при горении до оксида углерода;

Q_G – физическая теплота газа при его подогреве;

$Q_{\text{РАЗЛ.ВЛ}}$ – тепло, затраченное на разложение влаги;

$Q_{\text{ПР.ВОССТ}}$ – затраты на прямое восстановление железа;

$Q_{\text{РАЗЛ.ГОР}}$ – теплота на разложение вдуваемого в печь топлива;

$Q_{\text{ВОССТ.ВОД}}$ – затраты теплоты на восстановление оксидов железа водородом;

$Q_{\text{УХ}}$ – тепло, уносимое газами, покидающими нижнюю зону;

$Q_{\text{ПОТ}}$ – потери тепла в окружающую среду через фурменный прибор, заплечики, распар.

Тепловой индекс низа предложено оценивать как отношение

$$i_H = Q_H / Q_{\text{ОПТ}} \quad (18.117)$$

Все составляющие теплового баланса, входящие в уравнение (18.116), могут быть рассчитаны через соответствующие величины и непрерывно контролируемые параметры доменной печи и из этого уравнения могут быть получены количественные соотношения между управляющими воздействиями доменной плавки низа печи.

Так, для условия работы доменной печи объемом 1300 м³ на передельном чугуна при $t_0 = 850$ °С и атмосферном дутье получено значение Q_H , равное

$$Q_H = V_D (1010 + 1,422t_D - 7,34\phi_D \text{ ПГ}(8350 + 1,92\phi_D) - \\ - 2641000r_d - 44300 \text{ кДж/т}), \quad (18.118)$$

где V_D – расход дутья, м³/т;

t_D – температура дутья, °С;

ϕ_D – влажность дутья, г/м³;

ПГ – расход природного газа, м³/т;

r_d – степень прямого восстановления.

В предлагаемом в данной работе алгоритме количественных моделей управления с компенсацией по возмущению и по отклонению предлагается для заданных условий работы доменной печи заранее (на основании принятых критериев и полных моделей с учетом особенностей работы печей, которые в данном случае выполняют роль имитационно-оптимизирующего уровня (см. рис. 18.37)), определять степень воздействия управляющих воздействий на критерии (индексы) теплового состояния верха и низа печи и приводить в модели их дискретное изменение в соотношении с эквивалентными дискретными величинами других управляющих воздействий, необходимых для поддержания критериев состояния на постоянном (заданном) уровне (норма).

Именно такого рода модели на первом этапе и могут служить в качестве моделей реального времени для верхнего уровня управления тепловой работой доменной печи.

Для количественных моделей первого типа (моделей эквивалентного сохранения) подобный алгоритм может быть выражен в виде компенсационного уравнения (компенсация по возмущению), связывающего все отклонения управляющих и возмущающих воздействий и приводящего их к эквивалентному (по воздействию на определенный критерий) значению. При этом удобно отнести дискретные эквивалентные значения всех управляющих воздействий ΔA_i к единице изменения расхода кокса на 1 т чугуна (ΔK). В этом случае компенсационное уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$\Delta K_i \pm \sum \Psi_i \Delta A_i \pm \sum \psi_i A_i^* = 0, \quad (18.119)$$

где Ψ_i и ψ_i – соответствующие коэффициенты эквивалентного воздействия (коэффициенты замещения) на единицу изменения расхода кокса;

ΔA_i и ΔA_i^* – изменение управляющих и возмущающих воздействий.

Знак воздействия определяется, исходя из влияния управляющих воздействий на соответствующий критерий управления i_v и i_n .

При этом некоторые воздействия могут быть и нейтральными для определенной зоны. Известно, что температура дутья является нейтральным воздействием для верха печи, а расход кислорода

при температуре дутья около 1000 °С является нейтральным воздействием на низ печи.

Для моделей второго типа (моделей критериального отклонения) применяется в качестве исходного дискретное отклонение от нуля определяющего индекса или другого определяющего параметра состояния. Дискретные значения возмущающих и управляющих воздействий, включая расход кокса, определяются как эквивалентные (в смысле постоянства индекса) по отношению к изменению единицы индекса или определяющего параметра состояния

$$\Delta i = \sum (\pm \varphi_j \Delta B_j \pm \varphi_i \Delta B_i^*), \quad (18.120)$$

$$\Delta Z = \sum (\pm \varphi_\beta \Delta B_\beta \pm \varphi_\gamma \Delta B_\gamma^*), \quad (18.121)$$

где Δi и ΔZ – отклонение от нормы соответствующего индекса или определяющего параметра;

φ_j , φ_i , φ_β , φ_γ – соответствующие коэффициенты эквивалентного воздействия (коэффициенты замещения);

ΔB_j , ΔB_β , ΔB_i^* , ΔB_γ^* – соответствующие управляющие воздействия, включая расход кокса B и возмущающие воздействия B^* .

Модели второго типа обеспечивают управление доменной печью по отклонению определяющих параметров.

Возможность принятия для определенных условий постоянства коэффициентов Ψ_i , φ_i , φ_j и φ_β в формулах (18.119)–(18.121) объясняется, прежде всего, линейным характером влияния соответствующих управляющих воздействий на определенные критерии в довольно значительном диапазоне их изменения.

Анализ показывает, что для верха печи в качестве управляющих воздействий должны быть приняты: расход кокса K , расход природного газа ПГ, содержание кислорода в дутье O_2 , влага дутья φ_d . Параметром возмущения, в качестве примера, принята влага кокса W_k . Определяющим параметром может считаться температура колошника t_k . Тогда уравнения (18.119) и (18.121) принимают вид:

$$\Delta K + a_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} - a_{O_2} \Delta O_2 + a_{\varphi_d} \Delta \varphi_d - a_{w_k} \Delta W_k + \sum a_i \Delta A_i^* = 0; \quad (18.122)$$

$$-\Delta t_k = b_k \Delta K + b_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} - b_{O_2} \Delta O_2 + b_{\varphi_d} \Delta \varphi_d - b_{w_k} \Delta W_k + \sum b_\gamma \Delta B_\gamma^*. \quad (18.123)$$

Здесь a и b – коэффициенты эквивалентного воздействия и приведения к единой размерности воздействий (соответственно к расходу кокса, кг/т, и температуре, °C). Знаки в уравнениях (18.122) и (18.123) соответствуют влиянию этих воздействий на определяющий критерий (параметр) состояния печи. A_i^* и B_γ^* – другие возмущающие воздействия (кроме влаги кокса).

Для низа печи управляющими воздействиями также являются расход кокса K , температура дутья t_d , влага дутья ϕ_d , расход природного газа ПГ и содержание кислорода в дутье O_2 , а возмущающим воздействием опять же принимаем влагу кокса W_k . Определяющим характерным параметром приняты содержание кремния в чугуне Si или температура горна t_ϕ .

Тогда уравнения (18.119) и (18.121) принимают вид:

$$\Delta K + C_{t_d} \Delta t_d - C_{\phi_d} \Delta \phi_d + C_{ПГ} \Delta ПГ \pm C_{O_2} \Delta O_2 - C_{W_k} \Delta W_k + \sum C_i \Delta D_i^* = 0; \quad (18.124)$$

$$-\Delta Si = d_K \Delta K + d_{t_d} \Delta t_d - d_{\phi_d} \Delta \phi_d + d_{ПГ} \Delta ПГ \pm d_{O_2} \Delta O_2 - d_{W_k} \Delta W_k + \sum d_\gamma \Delta D_\gamma^*. \quad (18.125)$$

Здесь C и d – коэффициенты эквивалентного воздействия и приведения к единой размерности (к расходу кокса, кг); D_i^* и D_γ^* – другие возмущающие воздействия (кроме влаги кокса).

Знаки при управляющих воздействиях соответствуют их влиянию на определяющий индекс или параметр состояния низа печи.

Особенностью влияния содержания кислорода в дутье является различный знак воздействия при разном уровне температуры дутья: «минус» при $t_d > 1000$ °C и «плюс» при $t_d < 1000$ °C.

Как уже отмечалось, коэффициенты эквивалентного воздействия определяются исходя из структуры и соответствующих значений для индексов или определяющих параметров верха и низа печи.

Так, например, в основу определения коэффициентов $a_{ПГ}$ и $b_{ПГ}$ для верха доменной печи может быть положено соотношение теплотемкостей потоков и их отклонений от некоторого базового значения.

В частности, из соотношения (18.116) с учетом изменения степени прямого восстановления и используя стехиометрические уравнения горения кокса и инжектируемых топлив, было получено уравнение для коэффициента a_{III} , кг кокса/(м³·кг топлива) [18.135]

$$a_{\text{III}} = \frac{V_{\text{CO}}c_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2}c_{\text{H}_2} + V_{\text{N}_2}c_{\text{N}_2} + V_{\text{д}}^T c_{\text{д}}}{1,87 \frac{c_{\text{CO}}}{B_{\text{к}}} + 0,93 \frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{ф}} + C_{\text{д}}} \cdot \frac{N_{2\text{д}}}{O_{2\text{д}} B_{\text{к}}} c_{\text{N}_2} - \frac{W_{\text{г}}}{W_{\text{ш}}} c_{\text{к}}}, \quad (18.126)$$

где $V_{\text{д}}^T$ – расход дутья на единицу топлива, м³/ед. топлива;

$B_{\text{к}}$ – масса кокса, содержащая один кг углерода;

c_i – теплоемкость;

V_i – объемный расход потока;

к – кокс;

д – дутье.

В формуле (18.126) числитель представляет величину

$$T_{\text{x}} = V_{\text{CO}}c_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2}c_{\text{H}_2} + V_{\text{N}_2}c_{\text{N}_2} + V_{\text{д}}^T c_{\text{д}}, \quad (18.127)$$

в которую входят параметры, определяемые характеристиками вдуваемых топлив.

Так, для метана (природного газа) $T_{\text{x}} = 6,85$ кДж/(м³·К); для мазута $T_{\text{x}} = 8,58$ кДж/(кг·К); для угольной пыли $T_{\text{x}} = 2,30$ кДж/(кг·К).

Отметим, что при вдувании дополнительных топлив и кислорода величины соответствующих коэффициентов в формулах (18.124)–(18.127) могут определяться и лимитироваться не только тепловыми процессами, но и процессами восстановления в нижней части печи, процессами теплоотдачи в фурменной зоне, а также условиями газодинамического режима работы печи. В случаях, когда в процессе проверки по этим условиям величины коэффициентов замены кокса окажутся различными, необходимо принимать наименьшие их значения для того, чтобы выполнить остальные лимитирующие условия.

Таким образом, полученные модели эквивалентного сохранения с введением ограничений на протекание процессов восстановления и на развитие газодинамических процессов становятся универсальными моделями состояния доменной печи.

Так, из материального баланса процессов восстановления желе-
за критическая величина коэффициента $a_{\text{ПГ}}^{\text{восс}}$ равна

$$a_{\text{ПГ}}^{\text{восс}} = \left[11,2 \frac{H_2^{\text{в}}}{100} + \frac{C_{\text{в}}[(\text{Fe}_{\text{ч}} - \text{Fe}_{\text{м}}) - C_{\text{д}} 4,66 - V_{\text{H}_2} 2,5]}{100[C_{\text{д}} + C_{\text{д}}(\text{Si, Mn, P})] + C_{\text{ф}}} \right] /$$

$$/ \left[(\text{Fe}_{\text{ч}} - \text{Fe}_{\text{м}}) - (C_{\text{д}} - \frac{C_{\text{к}} C_{\text{д}}}{100 C_{\text{д}} + C_{\text{ф}}}) 4,66 - \right.$$

$$\left. - \frac{C_{\text{д}} + C_{\text{д}}(\text{Si, Mn, P}) + C_{\text{ф}} - \frac{C_{\text{к}}}{100} [(\text{Fe}_{\text{ч}} - \text{Fe}_{\text{м}}) - C_{\text{д}} 4,66 - V_{\text{H}_2} 2,5]}{C_{\text{д}} + C_{\text{д}}(\text{Si, Mn, P}) + C_{\text{ф}}} - \right.$$

$$\left. - V_{\text{H}_2} 2,55 \right], \quad (18.128)$$

где $C_{\text{ф}}$ – общее количество углерода, газифицируемого на фурмах, кг/т чугуна;

$C_{\text{д}}$ – количество углерода на прямое восстановление, кг/т чугуна;

$\text{Fe}_{\text{ч}}$ – количество железа в чугуне, кг/т чугуна;

$\text{Fe}_{\text{м}}$ – количество железа, вносимого металлодобавками, кг/т чугуна;

$C_{\text{к}}$ – концентрация углерода в коксе, %;

$H_2^{\text{в}}$ – концентрация водорода во вдуваемом топливе, %;

V_{H_2} – объем водорода во влаге дутья, м³/т чугуна;

$C_{\text{в}}$ – концентрация углерода во вдуваемом топливе, %.

В уравнении (18.128) так как знаменатель является величиной постоянной и выражение

$$\frac{C_{\text{в}}[(\text{Fe}_{\text{ч}} - \text{Fe}_{\text{м}}) - C_{\text{д}} 4,66 - V_{\text{H}_2} 2,5]}{100[C_{\text{д}} + C_{\text{д}}(\text{Si, Mn, P})] + C_{\text{ф}}}$$

также является величиной постоянной, то значение $a_{\text{ПГ}}^{\text{восс}}$ может быть рассчитано весьма оперативно.

Проверка коэффициента эквивалентного замещения по отношению теплоотдачи углерода кокса и топливной добавки проводится по формуле

$$\begin{aligned}
 a_{\text{III}}^{\phi} = & \frac{(C_p)_{\text{тд}} t_{\text{тд}} + (9218 + 23016\eta_{\text{CO}})C_{\text{тд}}}{(9798 + 2301\eta_{\text{CO}})C_{\text{к}} + 1,42t_{\text{к}}^{\text{H}} + \Delta g_1 - \Delta g_2} + \\
 & + \frac{(\Delta g_1 - \Delta g_2) \frac{C_{\text{тд}}}{C_{\text{к}}} \left\{ 10802 + \frac{0,536}{(1 - \eta_{\text{CO}})C_{\text{к}}} [\Delta g_1 - \Delta g_2 + (2,61 + 1,43\eta_{\text{CO}})C_{\text{к}} t_{\text{г}}^{\text{к}}] \right\}}{(9798 + 2301\eta_{\text{CO}})C_{\text{к}} + 1,42t_{\text{к}}^{\text{H}} + \Delta g_1 - \Delta g_2} \times \\
 & \times (H_2)_{\text{тд}} \eta_{\text{H}_2} - \frac{(1,332 + 0,778\eta_{\text{H}_2})(H_2)_{\text{тд}} t_{\text{г}}^{\text{к}} - Q_{\text{тд}}}{(9798 + 2301\eta_{\text{CO}})C_{\text{к}} + 1,42t_{\text{к}}^{\text{H}} + \Delta g_1 - \Delta g_2}. \quad (18.129)
 \end{aligned}$$

В этой формуле:

числитель – теплоотдача топливной добавки, кДж/м³;

знаменатель – теплоотдача кокса, кДж/кг;

$(C_p)_{\text{тд}} t_{\text{тд}}$ – энтальпия топливной добавки;

$\eta_{\text{CO}}, \eta_{\text{H}_2}$ – степень использования CO и H₂, доли ед.;

$C_{\text{тд}}$ – масса углерода в 1 м³ (кг) топливной добавки;

$C_{\text{к}}$ – массовая доля углерода в коксе;

$t_{\text{г}}^{\text{к}}$ – конечная температура газов, покидающих печь, °C;

$Q_{\text{тд}}$ – теплота разложения топливной добавки, кДж/(м³·кг);

$t_{\text{к}}^{\text{H}}$ – начальная температура кокса, °C;

O_2 – объемная доля кислорода в дутье;

$(H_2)_{\text{тд}}$ – количество водорода в топливной добавке, м³/(м³·кг);

Δg_1 – энтальпия дутья, кДж/кг, дополнительно вдуваемого углерода с учетом разложения влаги дутья и изменения количества углерода, сгорающего у фурм,

$$\begin{aligned}
 \Delta g_1 = & [1,382V_{\text{д}}^c (1 + 0,05O_2 + 1,525\phi_{\text{д}}) - 10802V_{\text{д}}\phi_{\text{д}} (1 - \eta_{\text{H}_2})] \cdot \times \\
 & \times (1 + \eta_{\text{CO}})C_{\text{к}}, \quad (18.130)
 \end{aligned}$$

где $V_{\text{д}}^c$ – расход дутья, м³/кг углерода, сгорающего у фурм;

$t_{\text{д}}$ – температура дутья, °C;

$\phi_{\text{д}}$ – влажность дутья, доли;

Δg_2 – энтальпия дополнительных газов (CO, CO₂, H₂, H₂O), покидающих печь при температуре, кДж/кг.

$$\Delta g_2 = \{2,61 + 1,43 \eta_{\text{CO}} + 1,382 V_{\text{д}}^c [1 - \text{O}_2 + \\ + \varphi_{\text{д}}(0,96 + 0,56 \eta_{\text{CO}})](1 + \eta_{\text{CO}})\} \times t_{\text{г}}^k C_{\text{к}}. \quad (18.131)$$

Проверку коэффициента эквивалентного воздействия (коэффициента замещения) по природному газу $a_{\text{пг}}$ по условию газодинамического режима рекомендуется проводить по соотношению выхода чугуна (производительности) без вдувания дополнительного топлива – $\text{П}'$ и после вдувания – $\text{П}''$.

При этом учитывается, что перепад давления не превысит допустимого значения с учетом изменения выхода горнового газа, плотности газового потока, насыпной массы шихты.

$$\text{П} \geq \frac{\text{П}''}{\text{П}'} = \sqrt{\frac{G_{\text{м}}'' V_{\text{м}}' \rho'}{V_{\text{м}}'' G_{\text{м}}' \rho''}} \cdot \frac{V_{\text{г}}'}{V_{\text{г}}''} \cdot 100 \%, \quad (18.132)$$

где П – изменение выхода чугуна, %;

ρ – плотность горнового газа, кг/м^3 ;

$V_{\text{г}}$ – выход горнового газа, $\text{м}^3/\text{т}$;

$G_{\text{м}}$ – расход шихтовых материалов (агломерат + кокс), кг/т чугуна;

$V_{\text{м}}$ – объем шихтовых материалов, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна.

Индекс «два штриха» относится к условиям при вдувании дополнительного топлива с принятым коэффициентом эквивалентного замещения, индекс «штрих» – к условиям без вдувания дополнительного топлива.

Одним из важнейших параметров состояния доменного процесса является теоретическая температура горения – показатель, характеризующий температурные условия в фурменных очагах. Часто считают, что именно с помощью этого показателя можно определять соотношения параметров комбинированного дутья по условию сохранения неизменной или получения заданной температуры горения. Особенно это отмечается в технологических инструкциях ведения доменного процесса. При этом устанавливаются допустимые по условиям нормативной работы печей значения теоретической температуры горения в определенном интервале.

При этом, если величина теоретической температуры определяется выбором соотношения «природный газ – кислород», то учитывается следующее:

- работа печей с пониженной температурой горения позволяет экономить кокс при снижении интенсивности (производительности) плавки;
- работа печей с повышенной температурой горения позволяет увеличить интенсивность плавки, но с перерасходом кокса;
- использование природного газа для поддержания в заданных пределах теоретической температуры горения связано с увеличением объема и соответственно скорости движения газов в доменной печи, а поэтому может ограничиваться газодинамическими условиями (см. также формулу (18.132)). Теоретическая температура горения t_T может быть определена по формуле

$$t_T = \frac{\Delta H'_\phi}{c_{\phi,г}}, \quad (18.133)$$

где $\Delta H'_\phi$ – количество тепла, выделяющегося у фурм на 1 м³ компонента;
 $c_{\phi,г}$ – теплоемкость фурменного газа.

Начальное теплосодержание фурменного газа рекомендуется принимать из следующих соображений. Температура кокса, поступающего в зону горения, равна $0,75t_T$, а теплосодержание углерода равно $0,4t_\phi$. Тогда долевая теплоемкость кокса, поступающего в зону горения,

$$c_k = 0,4 \cdot 0,75C'_\phi = 0,3C'_\phi, \quad (18.134)$$

где C'_ϕ – количество углерода, сгорающего у фурм (на 1 м³ сухого воздуха).

С учетом аппроксимации теплоемкостей продуктов сгорания в пределах температур фурменной зоны теплоемкость фурменного газа в зоне горения равна

$$c_{\phi,г} = 0,35(CO' + N_2) + 0,22H_2' - 0,3C'_\phi. \quad (18.135)$$

В формулах (18.133)–(18.135) величины определяются следующими соотношениями. Количество тепла, выделяющегося у фурм на 1 м³ компонента,

$$\begin{aligned} \Delta H'_\phi = & 2,2C'_\phi + \Delta H'_d + 0,38C_1 + 1,45C_2 + 2,43C_3 + 3,33C_4 + \\ & + 4,33C_5 - H_2S - 3,02CO_2 - 2,58H_2O, \end{aligned} \quad (18.136)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – содержание соответственно $CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}$, м³/м³ компонента;

H_2S, CO_2, H_2O – содержание, $м^3/м^3$ компонента;

$\Delta H'_d$ – относительное теплосодержание компонента дутья.

Количество углерода, сгораемого у фурм (на $1 м^3$ сухого воздуха)

$$C'_{\phi} = 0,225 + 0,667 \cdot 10^{-3} \phi_d + 1,072 O_2 + C'_{\phi.g} \Psi. \quad (18.137)$$

Выход фурменного газа:

$$CO' = 0,42 + 1,244 \cdot 10^{-3} \phi_d + 2O_2 + CO'_g \Psi; \quad (18.138)$$

$$H' = 1,244 \cdot 10^{-3} \phi_d + H'_{2g} \Psi; \quad (18.139)$$

$$N'_2 = 0,79 - O_2 + N'_{2g} \Psi, \quad (18.140)$$

где ϕ_d – количество водяного пара, $г/м^3$ сухого воздуха; O_2 – дополнительное содержание (более 0,21) кислорода, $м^3/м^3$; Ψ – расход горючего газа, $м^3/м^3$;

$C'_{\phi.g}, CO'_g, H'_{2g}, N'_{2g}$ – соответствующие показатели на $1 м^3$ горючего газа, рассчитанные по данным о его составе.

Вследствие неопределенности температуры кокса, поступающего в зону горения, в некоторых случаях рекомендуется пользоваться некоторой условной температурой горения, рассчитанной без учета теплосодержания углерода кокса.

Таким образом, разработка количественных управляющих воздействий на ход доменной плавки предусматривает оценку теплообменных, восстановительных и газодинамических процессов, их стабилизацию или изменение в необходимых пределах. Комплексность воздействия различных параметров на ход доменной печи позволяет решать вопросы экономичности плавки, возможности изменения ее интенсивности и управления протеканием процессов как автономно для верха и низа доменной печи, так и во всем ее объеме.

Примеры моделей эквивалентного сохранения и критериального отклонения для расчета корректирующих воздействий и динамических характеристик при ведении доменной плавки

Приведем некоторые примеры количественных моделей эквивалентного сохранения и критериального отклонения (с числовыми значениями коэффициентов эквивалентного воздействия) для верха

и низа доменной печи, полученные по результатам опубликованных работ [18.36; 18.68; 18.135; 18.136].

Для теплового состояния верха печи были получены следующие соотношения:

$$\Delta K + 1,36\PiГ - 19,1O_2 = 0; \quad (18.141)$$

$$-\Delta t_k = +\Delta K + 1,36\Delta\PiГ - 19,1O_2; \quad (18.142)$$

$$\Delta K + 1,7\PiГ - 42,0O_2 + 1,3\Delta\phi_d = 0; \quad (18.143)$$

$$-\Delta t_k = +0,58\Delta K + 1,05\Delta\PiГ - 19O_2 + 1,0\Delta\phi_d. \quad (18.144)$$

Для теплового состояния низа доменной печи были найдены зависимости, пригодные для решения задач управления:

$$\Delta K + 0,16t_d - 1,6\phi_d + 0,15\Delta\PiГ = 0; \quad (18.145)$$

$$-\Delta Si = +0,02\Delta K + 0,0033\Delta t_d - 0,0033\Delta\phi_d + 0,0031\Delta\PiГ; \quad (18.146)$$

$$\Delta K + 0,1\Delta t_d - 1,42\Delta\phi_d + 0,57\Delta\PiГ - 3,8\Delta O_2 = 0; \quad (18.147)$$

$$-\Delta Si = +0,01\Delta K + 0,01\Delta t_d - 0,0142\Delta\phi_d + \\ + 0,0057\Delta\PiГ - 0,0038\Delta O_2. \quad (18.148)$$

По исходным данным о конкретных условиях работы доменной печи № 1 ОАО «ММК» определена следующая зависимость: для условий доменной печи № 1 ОАО «ММК»

$$\Delta K + 0,14\Delta t_d - 1,3\Delta\phi_d + 0,47\Delta\PiГ - 2,9\Delta O_2 = 0. \quad (18.149)$$

Условия плавки, характеризующие работу доменной печи объемом 3200 м³ ОАО «НЛМК», описываются уравнениями:

$$\Delta K + 0,138\Delta t_d - 1,27\Delta\phi_d + 0,78\Delta\PiГ - 3,8\Delta O_2 = 0; \quad (18.150)$$

$$-\Delta Si = +0,0323\Delta K + 0,000445\Delta t_d - 0,0252\Delta\phi_d + \\ + 0,0252\Delta\PiГ - 0,1226\Delta O_2. \quad (18.151)$$

Отметим, что коэффициенты в уравнениях (18.141) и (18.151) нуждаются в дополнительном уточнении в связи с неопределенностью ряда расчетных величин.

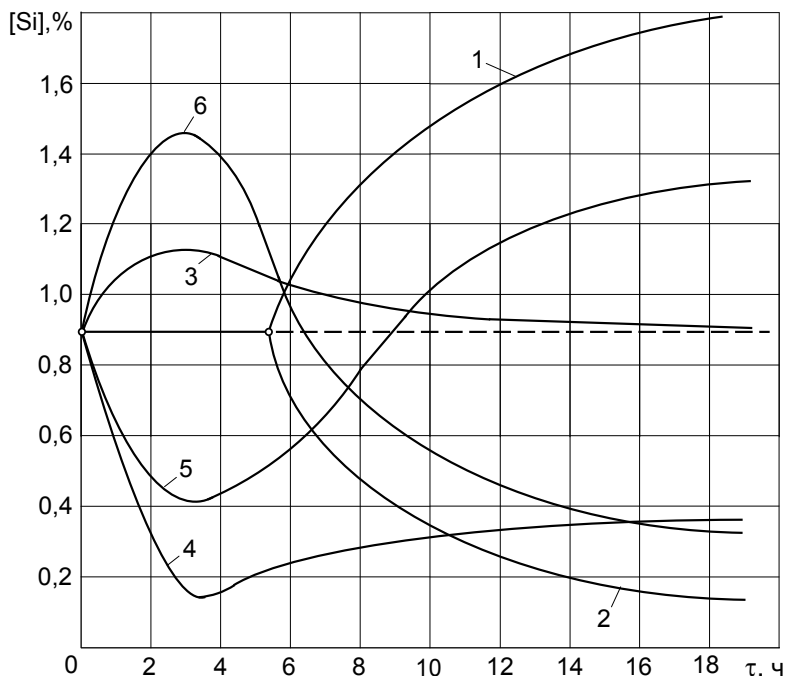


Рис.18.47. Динамические характеристики, отражающие влияние ступенчатых изменений регулирующих воздействий «сверху» и «снизу» на содержание кремния в чугуне $[Si]$ для конкретных условий работы доменной печи объемом 3200 м^3 ОАО «НЛМК»:

- 1 – при снижении рудной нагрузки на $0,2 \text{ т/т}$ чугуна;
- 2 – при повышении рудной нагрузки на $0,2 \text{ т/т}$ чугуна;
- 3 – при повышении температуры дутья на 50°C ;
- 4 – при повышении влажности дутья на 3 абс. \% ;
- 5 – при снижении содержания кислорода в дутье на 3 абс. \% ;
- 6 – при снижении расхода природного газа на 3% (к дутью)

С точки зрения динамики воздействий управления на определяющий критерий низа печи весьма показательным является рис. 18.47, полученный по данным исследований на доменной печи объемом 3200 м^3 ОАО «НЛМК» и представляющий, по существу, кривые разгона по содержанию Si в чугуне [18.131; 18.144].

Как видим, влияние скачкообразного изменения содержания кислорода в дутье и расхода природного газа является знакопеременным.

Таким образом, знаки коэффициентов при O_2 и ПГ в уравнениях (18.141)–(18.151) относятся к установившемуся состоянию печи.

Интересной особенностью (см. рис. 18.47) является перманентное взаимокомпенсирующее влияние на определяющий параметр в динамическом режиме содержания кислорода в дутье и расхода природного газа при их изменении в одном направлении (в данном случае при уменьшении на 3 % по отношению к расходу дутья). При этом при равном изменении по отношению к расходу дутья изменение расхода природного газа оказывается более сильным воздействием на содержание Si – по амплитуде в 1,33 раза, в установившемся состоянии в 1,2 раза, т. е. в среднем в 1,26 раза. Время реверса знака влияния этих управляющих воздействий на Si – 7–9 ч (в среднем 8 ч).

На рис. 18.47 наглядно видна также задержка в изменении Si (время запаздывания $\sim 5,5$ ч) при изменении рудной нагрузки. После времени запаздывания изменение содержания кремния идет по кривой, близкой к экспоненте, постоянная времени $T \approx 5,5$ ч. Общее время выхода определяющего параметра на установившееся состояние может превышать 18 ч.

Определение теоретической температуры горения

Рекомендуемая теоретическая температура горения зависит от вида выплавляемого чугуна или ферросплава, а также от многих факторов, таких как газопроницаемость, степень офлюсованности шихты и т. д. При выплавке ферромарганца эта температура равна около 2580–2880 °С (при содержании кислорода до 35 %), а при выплавке передельного чугуна она составляет 1800–2300 °С.

Для различных условий плавки в доменных печах формулы (18.133)–(18.135) могут быть представлены в несколько упрощенном виде и с использованием непосредственно значений температуры дутья, влажности дутья, содержания кислорода в дутье и расхода природного газа. Так, по данным ОАО ММК, теоретическая температура горения определяется по формуле

$$t_{\tau} = 2405 + 0,75(t_d - 1200) - 5,4\varphi_d + 43(O_2 - 21) - 52ПГ \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (18.152)$$

где t_d – температура дутья, °С; φ_d – влажность дутья, г/м³; O_2 – содержание кислорода в дутье, %; ПГ – объемный расход природного газа, % в дутье.

Пример определения теоретической температуры горения1. Температура дутья $t_d = 1150$ °С.

2. Влажность дутья

$$\varphi_d = \varphi_0 + G \cdot 1000 / V_d^{\text{изм}}, \quad (18.153)$$

где φ_0 – естественная влажность дутья, г/м³; G – массовый расход пара на увлажнение дутья, кг/мин; $V_d^{\text{изм}}$ – объемный расход холодного дутья, м³/мин.

Значение влажности дутья берется по данным для условий ОАО «ММК» для соответствующего месяца.

Среднемесячная влажность воздуха в условиях города Магнитогорска, г/м³, определяется величинами:

Месяцы	1-2	3	4	5	6-8	9	10	11	12
Влажность	1,5	2	3-4	6-8	10-12	6-8	5-6	3	2

Для 5-го месяца года $\varphi_0 = 8$ г/м³. При $G = 1,2$ т/ч или $G = 1,2 \cdot 1000/60 = 20$ кг/мин и $V_d^{\text{изм}} = 2900$ м³/мин влажность дутья $\varphi_0 = 8 + 20 \cdot 1000/2900 = 14,9$ г/м³.

3. Концентрация кислорода в дутье $O_2 = 26,5$ %.4. Объемный расход природного газа 15000 м³/ч, тогда

$$\text{ПГ} = 15000 \cdot 100 / (60 \times 2900) = 8,6 \text{ \%}.$$

Для этих условий

$$t_T = 2405 + 0,75(1150 - 1200) - 5,4 \cdot 14,9 + 43(26,5 - 21) - 52 \cdot 8,6 = 2076 \text{ °С}.$$

Теоретическая температура горения – показатель, характеризующий температурные условия в фурменных очагах и позволяющий определить соотношение параметров комбинированного дутья по условиям получения температуры горения в заданных пределах. Так, для условий ОАО «ММК» в контрольном режиме работы доменных печей значение теоретической температуры горения допускается в пределах 1950–2250 °С.

Количественные оценки и статические характеристики параметров доменного процесса

В работах Б.И. Китаева, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханова была разработана информационная система расчета количественных показателей доменного процесса и она была опробована путем включения новой

разработки в прикладное программное обеспечение АСУ ТП доменной печи объемом 2700 м³ ОАО «Северсталь» [18.35]. Результаты определения индексов i_B и i_H фиксировались на пункте управления печью. Некоторые сменные мастера печи запрашивали и использовали при ведении плавки данные о значении обобщенных параметров доменной плавки. При этом важно отметить следующие положения.

1. В зависимости от заданного интервала усреднения собираемой информации рассчитываемые обобщенные показатели характеризуют работу печи за подачу (за 15–20 мин.), ч, смену, сутки или более продолжительное время.

2. Функционирование информационной системы в режиме on line позволяет оценивать развитие доменного процесса при конкретных условиях работы печи, особенно в тех случаях, когда допускаются ошибки при дозировании шихтовых материалов, их свойства не соответствуют ожидаемым, нарушаются графики выпуска чугуна, осуществляются осадки шихты, приходится менять фурмы и т. п.

3. Использование информации о параметрах колошникового газа и некоторых других показателях позволяет учитывать влияние многих неконтролируемых возмущений на развитие доменного процесса, что чрезвычайно важно при решении задач оперативного контроля и управления.

Анализ результатов расчетов позволил определять статистические характеристики (см. рис. 18.48), которые отражают влияние регулирующих воздействий «сверху» (ΔK_n , $\Delta Fe_{оо}^A$) и «снизу» (ΔV_d , $\Delta V_{пг}$, $\Delta \omega_d$, $\Delta \phi_d$) на состояние доменного процесса, что оценивалось по дискретным изменениям рассчитываемых показателей (Δm , ΔB , Δi_B , ΔP_p^c , Δq_T , Δt_ϕ , ΔV_T , ΔQ_H , Δi_H). На рис. 18.48 изменения этих показателей указаны в процентах от их базовых значений и обозначены символом ΔS_j .

Подобные статистические характеристики позволяют технологам своевременно выявлять отклонения от нормы теплового состояния в верхней и нижней зонах печи и принимать необходимые меры воздействия на ход плавки.

Проведенные расчеты и сопоставление их с фактическими показателями работы доменных печей свидетельствуют о представительности обобщенных показателей тепловой работы доменных печей.

Так по индексу верха i_B можно судить о его оптимальном значении (около $i_B = 0,62$) по максимуму производительности печи. Индекс низа достаточно коррелируется с содержанием кремния Si в чугуне (см. рис. 18.49 и 18.50).

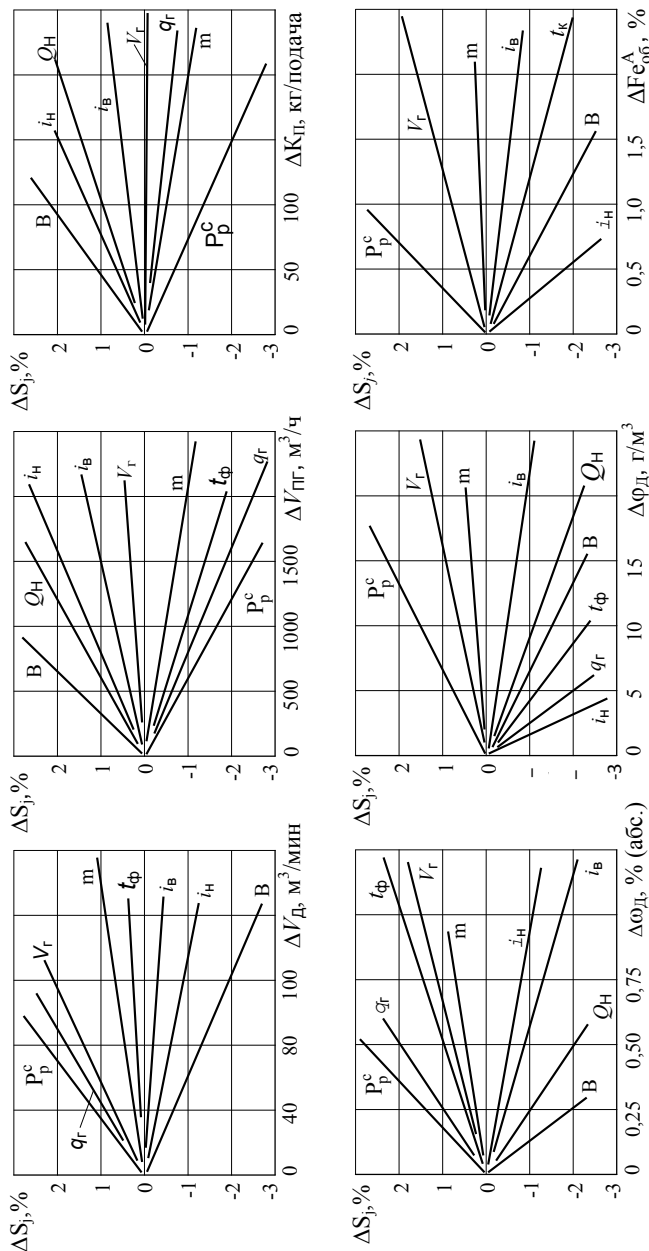


Рис. 18.48. Статические характеристики для регулирующих воздействий «сверху» и «снизу» на развитие доменного процесса при условиях работы печи объемом 2700 м^3 : i_b и i_n – индексы верха и низа; P_p^c – производительность печи; q_r – полезная тепловая мощность газового потока в нижней зоне печи; m – среднее для верхней зоны отношение теплоемкостей потоков шихты и газов; i_b – теоретическая температура фурменных газов; V_r – выход колошниковых газов; Q_n – удельный приход теплоты в нижнюю зону печи; B – показатель интенсивности теплообмена в верхней зоне печи; ΔV_d ; ΔV_{pr} ; ΔK_p ; $\Delta \omega_d$; $\Delta \phi_d$; ΔFe_{oo}^A – воздействия – расходы: дутья, природного газа, кокса; $\Delta \omega_d$ – содержание кислорода в дутье; $\Delta \phi_d$ – влажность дутья; ΔFe_{oo}^A – содержание железа в шихте

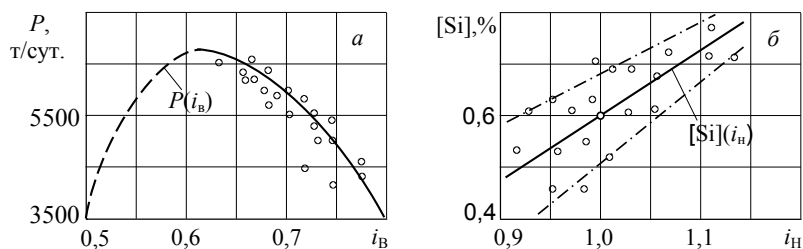


Рис. 18.49. Результаты оценки влияния обобщенных показателей теплового состояния верха и низа доменной печи i_B и i_H на производственные показатели: a – производительность печи P в функции i_B ; $б$ – содержание кремния в чугуне в функции i_H . Точки на графиках – фактические данные

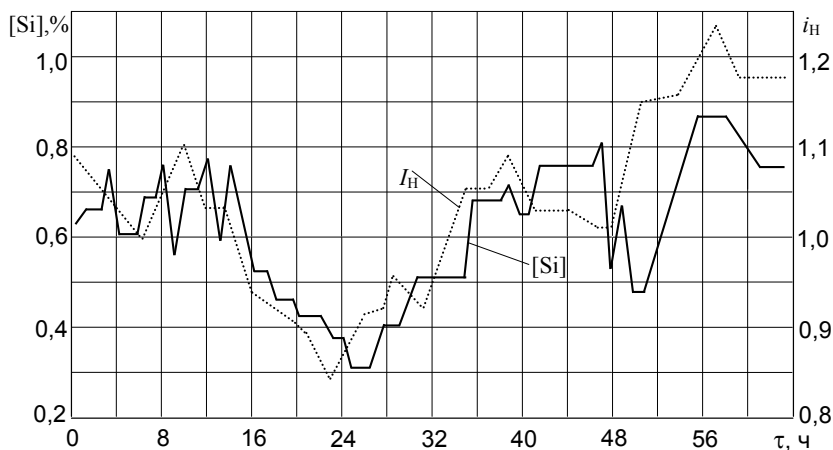


Рис. 18.50. Сопоставление кривых изменения во времени содержания кремния в чугуне на выпуске $[Si]$ и обобщенного параметра i_H , рассчитываемого в темпе с процессом с интервалом 15–20 мин по информации о работе печи объемом 2700 м³ ОАО «Северсталь»

18.5.5. Способ связного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь

Исходные положения и характеристики дискретных количественных моделей, изложенные выше, легли в основу разработки способа связного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь [18.35; 18.36; 18.157–18.159]. С точки зрения

авторов, рассмотренный ниже способ и приведенные алгоритмы являются своеобразным предвестником управления сложным объектом – доменной печью не только в режиме советчика, но и с использованием замкнутых контуров управления и контроля, а также предвестником непосредственного использования уже непрерывных сложных (двумерных) моделей в контуре управления (см. п. 18.5).

Таким образом, данный способ является своего рода дополнением, важной частью экспертных систем управления тепловым режимом доменной печи.

Целью разработанного способа было обеспечение управления доменным процессом путем регулирования подачей энергоносителей – управляющих воздействий – в темпе с процессом в автоматическом режиме без участия оператора.

Указанная цель достигается за счет того, что расходы основных энергоносителей (кокс, природный газ, кислород, влага дутья, дутье) связаны между собой в автоматическом режиме через автоматические регуляторы соотношения. При этом в процессе управления используются регуляторы соотношения для четырех основных видов энергоносителей доменной плавки: природный газ (или другие топливные добавки), кокс, кислород и влага дутья, при этом используются четыре регулятора соотношения: CO_K – «природный газ – кокс», CO_{O_2} – «природный газ – кислород», $CO_{фд}$ – «природный газ – влага дутья» и CO_d – «кислород – дутье», при этом задания регуляторам соотношений (уставки) определяются на основании балансовых уравнений энергетического сохранения одновременно для верха и низа печи, а работа регуляторов соотношения после нанесения возмущений протекает в две стадии: в статическом и динамическом режиме, причем для этих режимов задаются собственные уставки регуляторам соотношения и время статического и динамического режима работы регуляторов.

В данном случае ведущим расходом энергоносителей принят природный газ, колебания расходов которого возможны в силу различных причин, связанных с энергоснабжением, но возможно использование и любого из расходов энергоносителей в качестве ведущего расхода, например, кислорода.

Для определения уставок регуляторов соотношения CO_K , CO_{O_2} , $CO_{фд}$ и CO_d в статическом и динамическом режиме управления используется следующая методика. Как следует из теории теплообме-

на и ранее отмечено, верхняя и нижняя часть доменной печи работают в достаточно автономном режиме, поэтому отдельно для верха и низа печи записываются балансовые компенсационные уравнения энергетического сохранения, обеспечивающие в соответствии с [18.35; 18.120; 18.133–18.136] поддержание на определенном, нормальном и оптимальном уровне критериев или индексов теплового (энергетического) состояния верха и низа доменной печи. В данном случае удобно эти соотношения привязать к 1 кг кокса на 1 т чугуна.

При этом в силу запаздывания воздействия сверху в виде расхода кокса (на 4–5 ч) процесс управления делится на две стадии: стадия статического режима – через 4–5 ч после изменения подачи кокса – и стадия динамического режима – в течение этого периода.

Статический режим управления. При этом используются регулирующие воздействия: расход кокса, расход природного газа и кислорода; считается, что влага дутья находится на некотором минимальном постоянном уровне.

В этом режиме компенсационные балансовые уравнения энергетического сохранения соответственно для верха и низа доменной печи запишутся в виде:

$$\Delta K + a_{\text{III}} \Delta \Pi - a_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 + \sum_n a_n \Delta \alpha_n = 0; \quad (18.154)$$

$$\Delta K + C_{\text{III}} \Delta \Pi - C_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 + \sum_m C_m \Delta \beta_m = 0. \quad (18.155)$$

Динамический режим управления. При этом используются регулирующие воздействия: расход природного газа, кислорода и влага дутья. В этом режиме в силу отмеченного выше транспортного запаздывания расход кокса не оказывает влияния на тепловое состояние низа доменной печи.

Кроме того, в динамическом режиме природный газ и кислород имеют противоположный знак воздействия на тепловое состояние низа доменной печи по сравнению со статическим режимом. Это хорошо иллюстрируется рис. 18.47 [18.144], на котором по оси абсцисс отложено время в ч, а по оси ординат – приращение содержания кремния в чугуне в %, которое достаточно адекватно отражает тепловое состояние низа доменной печи. Как видим на этом рисунке, для управляющих воздействий – природный газ и кислород –

свойственен знакопеременный во времени характер воздействия на содержание кремния в чугуне и, следовательно, на тепловое состояние низа печи, при этом в динамическом режиме природный газ действует как охладитель, кислород – как разогреватель низа печи, а в статическом режиме – наоборот.

В этом случае в динамическом режиме без участия кокса уравнения (18.154) и (18.155) преобразуются к виду:

$$a'_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} - a'_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 + \sum_n a'_n \Delta \alpha_n = 0; \quad (18.156)$$

$$-C'_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} + C'_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 + \sum_m C'_m \Delta \beta_m = 0. \quad (18.157)$$

Уравнения (18.156) и (18.157) существуют как бы независимо друг от друга и из каждого уравнения получаются свои соотношения «кислород – природный газ» для верха и низа печи.

Компромиссное решение для верха и низа печи можно в этом случае получить, введя в рассмотрение в систему управления еще одно регулирующее воздействие для верха и низа доменной печи – расход влаги дутья.

Тогда с учетом того, что влага дутья несколько увеличивает индекс теплового состояния верха печи и снижает соответствующий индекс низа печи, уравнения энергетического сохранения соответственно для верха и низа доменной печи запишутся в виде:

$$a'_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} - a'_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 + a'_{\text{фд}} \Delta \text{ф}_д + \sum_n a'_n \Delta \alpha_n = 0; \quad (18.158)$$

$$-C'_{\text{ПГ}} \Delta \text{ПГ} + C'_{\text{O}_2} \Delta \text{O}_2 - C'_{\text{фд}} \Delta \text{ф}_д + \sum_m C'_m \Delta \beta_m = 0. \quad (18.159)$$

В уравнениях (18.154)–(18.159)

ΔK , $\Delta \text{ПГ}$, ΔO_2 , $\Delta \text{ф}_д$ – отклонения от, так называемого, базового (условно нулевого) уровня [18.35; 18.120; 18.133–18.136] управляющих воздействий – расходов, соответственно, кокса, природного газа, кислорода и влаги дутья, кг, м³, % O₂ и г/м³ дутья;

$\Delta \alpha_n$ и $\Delta \beta_m$ – изменение возмущающих воздействий (влаги кокса, температуры дутья, содержания железа в агломерате и т. д.) и основных параметров теплового состояния доменной печи (содержания кремния в чугуне, температуры колошника и т. д.);

$a_{\text{III}}, a_{\text{O}_2}, a_{\text{фд}}, a_n$ – численные коэффициенты для верха доменной печи;
 $C_{\text{III}}, C_{\text{O}_2}, C_{\text{фд}}, C_m$ – численные коэффициенты для низа доменной печи.
 Индекс «штрих» относится к величинам для динамического режима.
 Величины $\Delta K, \Delta \Pi$ отнесены к 1 т чугуна.

При этом в динамическом режиме в величины $\Delta \alpha_n$ и $\Delta \beta_m$ в формулах (18.156)–(18.159) не входят возмущающие воздействия сверху, так как они имеют примерно такое же транспортное запаздывание, как и расход кокса. Но для динамического режима остаются, так называемые, быстрые воздействия или воздействия снизу, в частности, расходы природного газа, кислорода и влаги дутья.

Численные коэффициенты и знаки воздействий в этих уравнениях определяются с использованием показателей – индексов теплового состояния для верха и низа доменной печи с корректировкой их на восстановительный потенциал горновых газов, газопроницаемость шихты, производительность печи и соотношение теплоотдачи природного газа и углерода кокса в горне доменной печи.

Особенностью данного способа является получение требуемых соотношений регулирующих воздействий путем одновременного решения двух пар уравнений: (18.154) и (18.155) – для статического режима и (18.156)–(18.159) – для динамического режима. Это обеспечивает наиболее благоприятные условия работы доменной печи, так как удовлетворяются условия нормального хода доменной печи одновременно как по условиям верха, так и низа доменной печи.

При этом используется управление подачей энергоносителей в комбинированном режиме – с использованием управляющих воздействий как для компенсации возмущающих воздействий (инвариантный принцип управления), так и для компенсации отклонений параметров состояния (принцип управления по отклонению).

Совместное решение уравнений (18.154) и (18.155) для статического режима дает соотношения $\text{CO}_K^{\text{ст}}$ и $\text{CO}_{\text{O}_2}^{\text{ст}}$ – «природный газ – кокс» и «природный газ – кислород» в виде:

$$\text{CO}_K^{\text{ст}} = \frac{\Delta K}{\Delta \Pi} = - \frac{1}{1 - C_{\text{O}_2} / a_{\text{O}_2}} \left[C_{\text{III}} - \frac{C_{\text{O}_2} a_{\text{III}}}{a_{\text{O}_2}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\Delta \Pi} \left(\frac{C_{\text{O}_2}}{a_{\text{O}_2}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n - \sum_m C_m \Delta \beta_m \right) \right], \quad (18.160)$$

$$CO_{O_2}^{ст} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{1}{a_{O_2}} \left(a_{ПГ} - \frac{C_{O_2} a_{ПГ}}{1 - C_{O_2} / a_{O_2}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta ПГ} \frac{\sum_n a_n \Delta \alpha_n - \sum_m C_m \Delta \beta_m}{1 - C_{O_2} / a_{O_2}} \right). \quad (18.161)$$

В динамическом режиме возможно два варианта решения.

Первый вариант основан на уравнениях (18.156), (18.157), когда влага дутья не используется в качестве управляющего воздействия, например, находится на минимальном уровне.

В этом случае уравнения (18.156) и (18.157) дают различные соотношения «природный газ – кислород» для верха и низа доменной печи, соответственно,

для верха

$$CO_{O_2}^{д.в} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{a'_{ПГ} + \frac{\sum_n a'_n \Delta \alpha_n}{\Delta ПГ}}{a'_{O_2}}; \quad (18.162)$$

для низа

$$CO_{O_2}^{д.н} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{C'_{ПГ} - \frac{\sum_m C'_m \Delta \beta_m}{\Delta ПГ}}{C'_{O_2}}. \quad (18.163)$$

Значение соотношения для верха и низа доменной печи может быть принято как среднее из значений для верха и низа доменной печи:

$$CO_{O_2}^д = \frac{CO_{O_2}^{д.в} + CO_{O_2}^{д.н}}{2}. \quad (18.164)$$

Кроме того, возможно решение компромиссной задачи для верха и низа доменной печи путем нахождения из уравнений (18.156) и (18.157), расхода природного газа $\Delta\Pi$ и принятия требуемого соотношения $\text{CO}_{\text{O}_2}^{\text{д}} = \Delta\text{O}_2 / \Delta\Pi$ (см. формулы (18.180) и (18.181)).

По данным [18.96], целесообразно в динамическом режиме сразу же использовать соотношение для низа печи $\text{CO}_{\text{O}_2}^{\text{д.н}}$, а среднее значение использовать в случае выхода параметра состояния для верха печи – температуры колошника – за пределы допускаемых значений.

При возможности использования в динамической стадии влаги дутья в качестве управляющего воздействия соотношения «природный газ – кислород» и «природный газ – влага дутья» получаем из совместного решения уравнений (18.158) и (18.159)

$$\text{CO}_{\text{O}_2}^{\text{д}} = \frac{\Delta\text{O}_2}{\Delta\Pi} = \frac{1}{a'_{\text{O}_2}} \left[\frac{C'_{\Pi\Gamma} - \frac{C'_{\text{O}_2} a'_{\Pi\Gamma}}{a'_{\text{O}_2}}}{C'_{\text{фд}} - C'_{\text{O}_2} \frac{a'_{\text{фд}}}{a'_{\text{O}_2}}} + \frac{\sum_n a'_n \Delta\alpha_n \left[\frac{C'_{\text{фд}} - \frac{C'_{\text{O}_2}}{a'_{\text{O}_2}} (a'_{\text{фд}} - 1) \right] + \sum_m C'_m \Delta\beta_m}{C'_{\text{фд}} - \frac{C'_{\text{O}_2}}{a'_{\text{O}_2}} a'_{\text{фд}}} \right], \quad (18.165)$$

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д}} = \frac{\Delta\text{фд}}{\Delta\Pi} = - \frac{1}{C'_{\text{фд}} - \frac{C'_{\text{O}_2} a'_{\text{фд}}}{a'_{\text{O}_2}}} \left[C'_{\Pi\Gamma} - \frac{C'_{\text{O}_2} a'_{\Pi\Gamma}}{a'_{\text{O}_2}} - \frac{1}{\Delta\Pi} \left(\frac{C'_{\text{O}_2}}{a'_{\text{O}_2}} \sum_n a'_n \Delta\alpha_n + \sum_m C'_m \Delta\beta_m \right) \right]. \quad (18.166)$$

В случае использования природного газа, но отсутствия обогащения кислородом, что иногда имеет место на доменных печах, в статическом режиме и в динамической стадии воздействия используется влага дутья и соответствующие соотношения запишутся следующим образом.

В статическом режиме:

$$\Delta K + a_{\Pi\Gamma} \Delta \Pi\Gamma + a_{\varphi_d} \Delta \varphi_d + \sum_n a_n \Delta \alpha_n = 0; \quad (18.167)$$

$$\Delta K + C_{\Pi\Gamma} \Delta \Pi\Gamma - C_{\varphi_d} \Delta \varphi_d + \sum_m C_m \Delta \beta_m = 0. \quad (18.168)$$

В динамическом режиме

$$a'_{\Pi\Gamma} \Delta \Pi\Gamma + a'_{\varphi_d} \Delta \varphi_d + \sum_n a'_n \Delta \alpha_n = 0; \quad (18.169)$$

$$-C'_{\Pi\Gamma} \Delta \Pi\Gamma - C'_{\varphi_d} \Delta \varphi_d + \sum_m C'_m \Delta \beta_m = 0. \quad (18.170)$$

В этом случае в динамическом режиме необходимо принимать компромиссное (например, среднее) соотношение $CO_{\varphi_d}^{\text{д}}$ для «природного газа – влаги дутья» для верха и низа доменной печи. Из уравнений (18.169) и (18.170), соответственно,

для верха печи

$$CO_{\varphi_d}^{\text{д.в}} = \frac{\Delta \varphi_d}{\Delta \Pi\Gamma} = - \frac{a'_{\Pi\Gamma} + \frac{\sum_n a'_n \Delta \alpha_n}{\Delta \Pi\Gamma}}{a'_{\varphi_d}}; \quad (18.171)$$

для низа печи

$$CO_{\varphi_d}^{\text{д.н}} = \frac{\Delta \varphi_d}{\Delta \Pi\Gamma} = - \frac{C'_{\Pi\Gamma} - \frac{\sum_m C'_m \Delta \beta_m}{\Delta \Pi\Gamma}}{C'_{\varphi_d}}. \quad (18.172)$$

Среднее значение:

$$CO_{\varphi_d}^{\text{д}} = \frac{CO_{\varphi_d}^{\text{д.в}} + CO_{\varphi_d}^{\text{д.н}}}{2}. \quad (18.173)$$

Кроме того, и в этом случае возможно решение компромиссной задачи для верха и низа доменной печи путем определения из уравнений (18.169), (18.170) величины $\Delta \Pi\Gamma$ и соотношения $CO_{\varphi_d} = \Delta \varphi_d / \Delta \Pi\Gamma$ (см. формулы (18.183) и (18.184)).

Для статического режима решение уравнений (18.167) и (18.168) дает значение соотношения $\text{CO}_K^{\text{ст}}$ и $\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{ст}}$ – «природный газ – кокс» и «природный газ – влага дутья»:

$$\text{CO}_K^{\text{ст}} = \frac{\Delta K}{\Delta \Pi} = - \frac{1}{1 + C_{\text{фд}} / a_{\text{фд}}} \left[C_{\Pi} + \frac{C_{\text{фд}}}{a_{\text{фд}}} a_{\Pi} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta \Pi} \left(\frac{C_{\text{фд}}}{a_{\text{фд}}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n + \sum_m C_m \Delta \beta_m \right) \right], \quad (18.174)$$

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{ст}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{д}}}{\Delta \Pi} = - \frac{1}{a_{\text{фд}} (1 + C_{\text{фд}} / a_{\text{фд}})} \left[a_{\Pi} - C_{\Pi} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta \Pi} \left(\sum_n a_n \Delta \alpha_n + \sum_m C_m \Delta \beta_m \right) \right]. \quad (18.175)$$

Приведенные данные и уравнения свидетельствуют о возможности определения компромиссных соотношений для основных управляющих воздействий доменной печи: «природный газ – кокс», «природный газ – кислород», «природный газ – влага дутья», удовлетворяющих требованиям как верха, так и низа доменной печи, и, следовательно, обеспечивающих наиболее эффективное протекание теплообменных и восстановительных процессов в доменной печи.

При этом для статического режима определяющими являются соотношения «природный газ – кокс», «природный газ – кислород», и в случае отсутствия обогащения кислородом – «природный газ – кокс», «природный газ – влага дутья».

В динамическом режиме (в течение 4–5 ч после изменения расхода кокса) определяющим является соотношение «природный газ – кислород» или «природный газ – кислород» и «природный газ – влага дутья». В случае отсутствия обогащения кислородом – «природный газ – влага дутья».

Известно также, что подача кислорода в доменную печь связана с расходом дутья. Поэтому в данном способе во всех случаях изменения расхода кислорода (в статическом и динамическом режимах

работы) предусмотрено выдерживать соотношение между расходом кислорода и расходом дутья по выражению [18.160]

$$\text{CO}_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta \text{O}_2} = V_d \frac{K_d}{100}, \quad (18.176)$$

где V_d – расход дутья, м³/мин; ΔV_d – изменение расхода дутья; K_d – коэффициент изменения расхода дутья на 1 % обогащения дутья кислородом. Например, по данным АО Магнитогорского металлургического комбината [18.160], $K_d = 0,8$. Тогда

$$\text{CO}_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta \text{O}_2} = 0,008 V_d. \quad (18.177)$$

При использовании предлагаемого способа управления возможно протекание процесса управления по двум вариантам.

В первом варианте управления не происходит отклонение от базовых значений каких-либо возмущающих воздействий или параметров состояния, т. е. при этом в формулах (18.160)–(18.175) величины $\Delta \alpha_v = 0$ и $\Delta \beta_\mu = 0$. В этом случае при изменении (отклонении от базового значения) по каким-либо причинам одного из управляющих воздействий (кокса, природного газа, кислорода, влаги дутья) изменение остальных управляющих воздействий проводится непосредственно по соотношениям, определяемым формулами (18.160)–(18.175) для статического и динамического режима работы.

Во втором варианте управления имеет место отклонение от базовых значений возмущающих воздействий (температуры дутья, влаги кокса, содержания железа в шихте, температуры агломерата и т. д.) и параметров состояния (температуры колошника, содержания кремния в чугуне и т. д.). При этом в формулах (18.160)–(18.175) величины $\Delta \alpha_v \neq 0$ и $\Delta \beta_\mu \neq 0$.

При этом как следует из формул (18.160)–(18.175) для определения требуемых соотношений «кокс – природный газ», «кислород – природный газ», «влага дутья – природный газ» необходимо задаваться определенной величиной $\Delta \Pi$, направленной на компенсацию указанных возмущений. Эта величина может быть определена из соответствующих технологических инструкций.

Однако возможен и другой путь. Компенсирующая величина $\Delta \Pi$ может быть, наоборот, найдена из уравнений (18.160), (18.175)

при задании определенного соотношения $\Delta K / \Delta ПГ$, например, в рамках принятого по технологической инструкции коэффициента замещения расхода кокса природным газом. Например, по данным [18.160] величина

$$\delta_K = \Delta K / \Delta ПГ = -0,7 \text{ кг/м}^3 \text{ природного газа.}$$

В случае отклонения возмущающих воздействий от базовых значений величина δ_K может быть скорректирована по известным методам [18.35; 18.96; 18.120; 18.133–18.136].

Так из формулы (18.160) для статического режима при наличии обогащения кислородом требуемый для компенсации возмущающих воздействий или отклонений параметров состояния от базовых значений расход природного газа равен

$$\Delta ПГ = \frac{\frac{C_{O_2}}{a_{O_2}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n - \sum_m C_m \beta_m}{\delta_K \left(1 - \frac{C_{O_2}}{a_{O_2}} \right) + \left(C_{ПГ} - \frac{C_{O_2} a_{ПГ}}{a_{O_2}} \right)}. \quad (18.178)$$

Требуемый расход кокса определяется из соотношения

$$\delta_K = \frac{\Delta K}{\Delta ПГ}. \quad (18.179)$$

Требуемый расход кислорода ΔO_2 в этом случае определяется по формуле (18.161) в зависимости от определенного по формуле (18.178) расхода природного газа $\Delta ПГ$.

В динамическом режиме формула определения требуемой величины $\Delta ПГ$ получается из соотношений (18.156), (18.157), тогда

$$\Delta ПГ = \frac{\frac{C'_{O_2}}{a'_{O_2}} \sum_n a'_n \Delta \alpha_n + \sum_m C'_m \Delta \beta_m}{C'_{ПГ} - \frac{C'_{O_2}}{a'_{O_2}} a'_{ПГ}}. \quad (18.180)$$

Требуемый расход кислорода ΔO_2 без использования влаги дутья в соответствии с формулами (18.156), (18.157) и (18.180) определяется из соотношения

$$\text{CO}_{\text{O}_2}^{\text{д}} = \frac{\Delta \text{O}_2}{\Delta \text{ПГ}} = \frac{a'_{\text{ПГ}} \sum_m C'_m \Delta \beta_m + C'_{\text{ПГ}} \sum_n a'_n \Delta \alpha_n}{C'_{\text{O}_2} \sum_n a'_n \Delta \alpha_n + a'_{\text{O}_2} \sum_m C'_m \Delta \beta_m}. \quad (18.181)$$

При использовании влаги дутья требуемый расход кислорода ΔO_2 определяется из соотношения (18.165), требуемый расход влаги дутья – по формуле (18.166).

При отсутствии применения обогащения кислородом из формулы (18.174) для статического режима определяется требуемый для компенсации возмущающих воздействий или отклонения параметров состояния от базовых значений расход природного газа

$$\Delta \text{ПГ} = - \frac{\frac{C_{\text{фд}}}{a_{\text{фд}}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n + \sum_m C_m \Delta \beta_m}{\delta_K \left(1 + \frac{C_{\text{фд}}}{a_{\text{фд}}} \right) + \left(C_{\text{ПГ}} + \frac{C_{\text{фд}} a_{\text{ПГ}}}{a_{\text{фд}}} \right)}. \quad (18.182)$$

Требуемый расход кокса определяется по формуле (18.179).

Требуемый расход влаги дутья определяется по формуле (18.175).

В динамическом режиме формула для $\Delta \text{ПГ}$ получается из формул (18.169), (18.170)

$$\Delta \text{ПГ} = - \frac{\frac{C'_{\text{фд}}}{a'_{\text{фд}}} \sum_n a'_n \Delta \alpha_n + \sum_m C'_m \Delta \beta_m}{-C'_{\text{ПГ}} + \frac{C'_{\text{фд}} a'_{\text{ПГ}}}{a'_{\text{фд}}}}. \quad (18.183)$$

В этом случае требуемый расход влаги дутья $\Delta \text{ф}_\text{д}$ определится в соответствии с формулами (18.169), (18.170) из соотношения

$$\text{CO}_{\text{фд}} = \frac{\Delta \text{ф}_\text{д}}{\Delta \text{ПГ}} = - \frac{C_{\text{ПГ}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n + a_{\text{ПГ}} \sum_m C_m \Delta \beta_m}{C_{\text{фд}} \sum_n a_n \Delta \alpha_n + a_{\text{фд}} \sum_m C_m \Delta \beta_m}. \quad (18.184)$$

В случае отклонения параметров состояния от базовых значений или нанесения быстрых возмущающих воздействий предпочтительно использование «быстрых» управляющих воздействий снизу (расход

природного газа, кислорода, влаги дутья). В этом случае для определения расхода природного газа для статического режима применяются формулы для статического же режима (18.178) и (18.182) для случаев применения обогащения кислородом и без применения обогащения кислородом соответственно при условии $\Delta K = 0$ и $\delta_k = 0$. Требуемые расходы кислорода ΔO_2 определяются в этом случае в соответствии с формулами (18.154) и (18.155) при $\Delta K = 0$ из соотношения

$$CO_{O_2} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{C_{ПГ} \sum_n a_n \Delta \alpha_n - a_{ПГ} \sum_m C_m \Delta \beta_m}{C_{O_2} \sum_n a_n \Delta \alpha_n - a_{O_2} \sum_m C_m \Delta \beta_m}. \quad (18.185)$$

Требуемый расход влаги дутья $\Delta \delta_d$ при отсутствии применения обогащения кислородом в соответствии с формулами (18.167) и (18.1168) при $\Delta K = 0$ определится из соотношения

$$CO_{\phi_d} = \frac{\Delta \phi_d}{\Delta ПГ} = \frac{C_{ПГ} \sum_n a_n \Delta \alpha_n - a_{ПГ} \sum_m C_m \Delta \beta_m}{C_{\phi_d} \sum_n a_n \Delta \alpha_n + a_{\phi_d} \sum_m C_m \Delta \beta_m}. \quad (18.186)$$

В динамическом режиме при использовании обогащения кислородом для определения расходов природного газа $\Delta ПГ$ используется формула (18.180). Соотношение CO_{O_2} определяется в этом случае по формуле (18.181), а при использовании влаги дутья соотношения CO_{O_2} и CO_{ϕ_d} определяются по формулам соответственно (18.165) и (18.166). При этом в случае использования влаги дутья в динамическом режиме в статическом режиме она приводится к нулевому (базовому) значению (см. рис. 18.51).

В динамическом режиме без использования обогащения кислородом требуемый расход природного газа $\Delta ПГ$ определяется по формуле (18.183), а соотношение CO_{ϕ_d} – по формуле (18.184).

Покажем возможности управления подачей энергоносителей на конкретных примерах для доменной печи. По данным [18.35; 18.120; 18.133–18.126] принимаем следующие значения коэффициентов в приведенных формулах:

$$a_{ПГ} = 1,7 \text{ кг/м}^3; \quad a_{O_2} = 42 \text{ кг/\%O}_2; \quad C_{ПГ} = 0,57 \text{ кг/м}^3; \quad C_{O_2} = 3,8 \text{ кг/\%O}_2;$$

$$a_{\text{фд}} = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{г/м}^3 \text{ дутья}}; \quad C_{\text{фд}} = 1,42 \frac{\text{кг}}{\text{г/м}^3 \text{ дутья}}.$$

При этом расходы кокса и природного газа отнесены к 1 т чугуна.

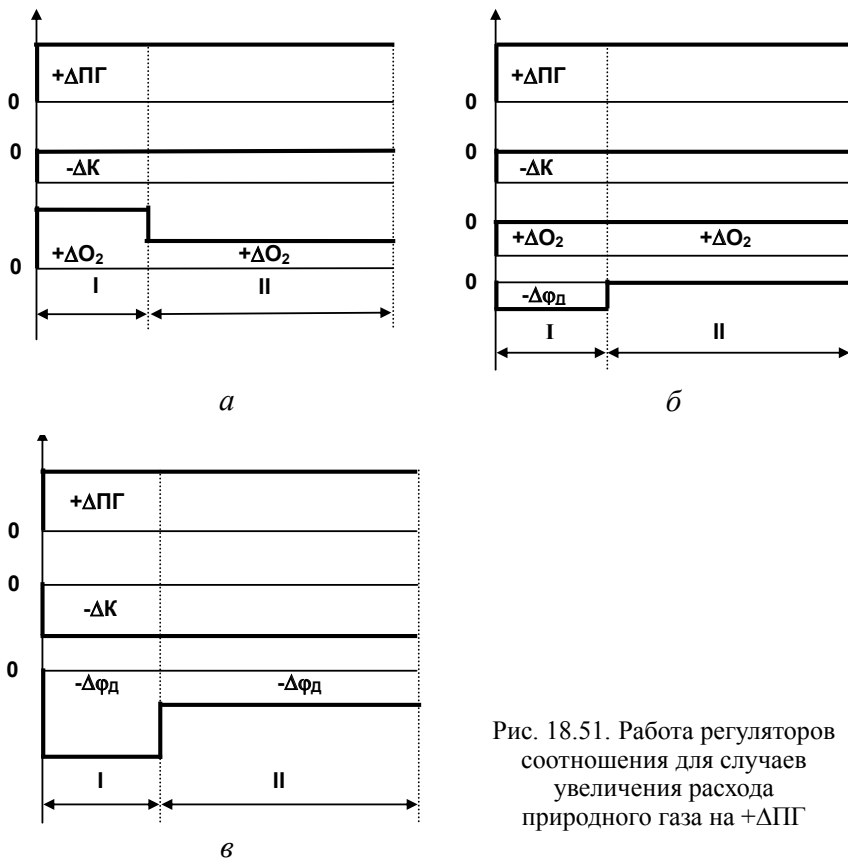


Рис. 18.51. Работа регуляторов соотношения для случаев увеличения расхода природного газа на $+\Delta\text{ПГ}$

1. Работа доменной печи с обогащением дутья кислородом

При этом, используя [18.144], в первом приближении принимаем одинаковые численные значения коэффициентов для статического и динамического режимов работы.

Для упрощения принимаем $\Delta\alpha_n = 0$ и $\Delta\beta_m = 0$.

Тогда по формулам (18.160) и (18.161) в статическом режиме

$$CO_{K}^{ст} = \frac{\Delta K}{\Delta ПГ} = -\frac{1}{1-3,8/42} \left[0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42} \right] = -0,4576 \text{ кг/м}^3,$$

$$CO_{O_2}^{ст} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{1}{42} \left(1,7 - \frac{0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42}}{1-3,8/42} \right) = 0,0296 \text{ \%O}_2/\text{м}^3.$$

В динамическом режиме при работе без влаги дутья в качестве управляющего воздействия по формулам (18.162)–(18.164)

$$CO_{O_2}^{д.в} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{1,7}{42} = 0,0405 \text{ \% O}_2/\text{м}^3,$$

$$CO_{O_2}^{д.н} = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{0,57}{3,8} = 0,1500 \text{ \% O}_2/\text{м}^3,$$

$$CO_{O_2}^д = \frac{CO_{O_2}^{д.в} + CO_{O_2}^{д.н}}{2} = \frac{0,0405 + 0,1500}{2} = 0,0953 \text{ \% O}_2/\text{м}^3.$$

В динамическом режиме при работе с влагой дутья по формулам (18.165), (18.166)

$$CO_{O_2}^д = \frac{\Delta O_2}{\Delta ПГ} = \frac{1}{42} \left(1,7 - 1,3 \frac{0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42}}{1,42 - 3,8 \frac{1,3}{42}} \right) = 0,0306 \text{ \% O}_2/\text{м}^3,$$

$$CO_{фд}^д = \frac{\Delta \varphi_d}{\Delta ПГ} = -\frac{1}{1,42 - \frac{3,8 \cdot 1,3}{42}} \left(0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42} \right) = -0,3196 \frac{\text{г/м}^3}{\text{м}^3}.$$

При изменении расхода кислорода соотношение «кислород – дутье» определяется по формуле (18.177), в частности, при $V_d = 2900 \text{ м}^3/\text{мин}$

$$CO_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta O_2} = 0,008 \cdot 2900 = 23,2 \frac{\text{м}^3/\text{мин}}{\text{\% O}_2}.$$

2. Работа доменной печи без обогащения дутья кислородом в статическом режиме по формулам (18.174) и (18.175)

$$\text{CO}_K^{\text{ст}} = \frac{\Delta K}{\Delta \Pi} = - \frac{1}{1 + \frac{1,42}{1,3}} \left(0,57 + \frac{1,42}{1,4} 1,7 \right) = -1,1599 \text{ кг/м}^3,$$

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{ст}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{д}}}{\Delta \Pi} = - \frac{1}{1,3 \left(1 + \frac{1,42}{1,3} \right)} (1,7 - 0,57) = -0,4154 \frac{\text{г/м}^3}{\text{м}^3}.$$

В динамическом режиме по формулам (18.171)–(18.173)

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д.в}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{д}}}{\Delta \Pi} = - \frac{1,7}{1,3} = -1,308 \frac{\text{г/м}^3}{\text{м}^3},$$

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д.н}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{д}}}{\Delta \Pi} = - \frac{0,57}{1,42} = -0,4014 \frac{\text{г/м}^3}{\text{м}^3},$$

$$\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д}} = \frac{\text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д.в}} + \text{CO}_{\text{фд}}^{\text{д.н}}}{2} = \frac{-1,308 - 0,4014}{2} = -0,855 \frac{\text{г/м}^3}{\text{м}^3}.$$

Работу регуляторов соотношения в данных примерах 1 и 2 проиллюстрируем графиками (см. рис. 18.51) для случаев увеличения расхода природного газа на $\Delta \Pi$. На этой фигуре: 0 – принятый нулевой уровень; расходы: ΔK – кокса, $\Delta \Pi$ – природного газа, ΔO_2 – кислорода, $\Delta \varphi_{\text{д}}$ – влаги дутья; *a*, *б* – при наличии кислорода; *в* – при отсутствии кислорода; I – динамический режим; II – статический режим, при этом в случаях *a* и *б* динамический режим I отличается соответственно неиспользованием и использованием влаги дутья в качестве управляющего воздействия.

Графики рис. 18.51 характеризуют работу соответствующих регуляторов соотношения при увеличении расхода природного газа на $+\Delta \Pi$.

При наличии подачи кислорода (рис. 18.51, *a*) в статическом режиме (II, *a*) увеличение расхода природного газа на $\Delta \Pi$ приводит к снижению расхода кокса на $-\Delta K$ и увеличению расхода кислорода на $+\Delta \text{O}_2$ по уравнениям (18.160) и (18.161).

В динамическом режиме (I, а) пока подача кокса еще не влияет на работу низа доменной печи приходится принять более значительную подачу кислорода $+\Delta O_2$ по уравнениям (18.162)–(18.164). В случае возможности использования в динамическом режиме расхода влаги дутья (I, б) изменение расхода кислорода и влаги дутья определяем по соотношениям (18.165) и (18.166). Примеры расчета соотношений приведены ранее.

При отсутствии обогащения кислородом на доменной печи (рис. 18.51, в) в статическом режиме (II, в) в случае увеличения расхода природного газа расход кокса $-\Delta K$ и влаги дутья $-\Delta f_d$ изменяются по уравнениям (18.174) и (18.175). В динамическом режиме (I, в), пока влияние уменьшенного расхода кокса в нижней части доменной печи еще не реализуется, требуется более значительное, по сравнению со статическим режимом, уменьшение расхода влаги дутья $-\Delta f$ по уравнениям (18.171)–(18.173). Примеры расчета соотношений см. выше.

3. Работа доменной печи с обогащением дутья кислородом.

Возмущающее воздействие – снижение температуры дутья на 100°C : $\Delta T_d = -100^\circ\text{C}$.

По данным [18.35; 18.120], $C_m = C_{Td} = -0,16$ кг кокса / град.

Рассчитаем требуемый для компенсации данного возмущения расход природного газа. При этом используем быстрое воздействие снизу (без изменения расхода кокса). При этом в силу автономности тепловой работы верха и низа доменной печи можно принять для верха печи для возмущающего воздействия по температуре дутья $a_n = a_{Td} = 0$.

3.1. Статический режим. Для определения расхода природного газа $\Delta\Pi$ применяем формулу (18.178) при $\delta_K = \Delta K / \Delta\Pi = 0$.

$$\Delta\Pi = \frac{-0,16 \cdot (-100)}{0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42}} = 38,46 \text{ м}^3/\text{т чугуна}.$$

Соотношение «кислород – природный газ» для статического режима находим по формуле (18.185) при $a_n = 0$

$$\text{CO}_{O_2} = \frac{\Delta O_2}{\Delta\Pi} = \frac{-1,7}{-42} = 0,0405 \text{ \%O}_2/\text{м}^3.$$

Таким образом, при нанесении данного возмущения в статическом режиме расход природного газа увеличится на $38,46 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна и содержание кислорода в дутье возрастет на $0,0405 \cdot 38,46 = 1,558 \% \text{ O}_2$.

3.2. Динамический режим. В динамическом режиме расход природного газа (без использования влаги дутья) определяется по формуле (18.180)

$$\Delta\Pi = \frac{0,16 \cdot (-100)}{0,57 - \frac{3,8 \cdot 1,7}{42}} = -38,46 \text{ м}^3/\text{т чугуна}.$$

Соотношение «кислород – природный газ» находим по формуле (18.181)

$$\text{CO}_{\text{O}_2} = \frac{\Delta\text{O}_2}{\Delta\Pi} = \frac{1,7}{42} = 0,0405 \frac{\% \text{O}_2}{\text{м}^3}.$$

Таким образом, в динамическом режиме расход природного газа, наоборот, должен снизиться на $38,46 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна и расход кислорода также снизится на $0,0405 \cdot 38,46 = 1,558 \% \text{ O}_2$.

4. Применение природного газа в доменной печи при отсутствии обогащения кислородом.

Возмущающее воздействие – снижение температуры дутья на 100°C . Коэффициенты в уравнении энергетического сохранения те же, что и в примере 3, кроме того, для влаги дутья

$$a_{\text{фд}} = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{г}/\text{м}^3 \text{ дутья}} \text{ и } C_{\text{фд}} = 1,42 \frac{\text{кг}}{\text{г}/\text{м}^3 \text{ дутья}}.$$

4.1. Статический режим. По формуле (18.182) определяем при $\delta_{\text{к}} = 0$ приращение расхода природного газа $\Delta\Pi$

$$\Delta\Pi = -\frac{0,16 \cdot (-100)}{0,57 + \frac{1,42 \cdot 1,7}{1,3}} = 6,61 \text{ м}^3/\text{т чугуна}.$$

Соотношение «влага дутья – природный газ» для статического режима определяем по формуле (18.186)

$$\text{CO}_{\text{фд}} = \frac{\Delta\text{фд}}{\Delta\Pi} = \frac{-1,7}{1,3} = -1,3076 \frac{\text{г}/\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

В этом случае расход природного газа увеличится на

$$\Delta \text{ПГ} = 6,61 \text{ м}^3/\text{т чугуна},$$

а содержание влаги дутья уменьшится на

$$\Delta \varphi_{\text{д}} = 1,3076 \cdot 6,61 = 8,644 \text{ г / м}^3 \text{ дутья}.$$

4.2. Динамический режим. По формуле (18.183) определяем приращение природного газа $\Delta \text{ПГ}$

$$\Delta \text{ПГ} = - \frac{0,16(-100)}{-0,57 + \frac{1,42 \cdot 1,7}{1,3}} = -12,43 \frac{\text{г / м}^3}{\text{м}^3}.$$

Соотношение $\text{CO}_{\text{фд}}$ определяем по формуле (18.184)

$$\text{CO}_{\text{фд}} = \frac{\Delta \varphi_{\text{д}}}{\Delta \text{ПГ}} = - \frac{1,7}{1,3} = -1,3076 \frac{\text{г / м}^3}{\text{м}^3}.$$

В этом случае в динамическом режиме расход природного газа снизится на $12,43 \text{ м}^3/\text{т чугуна}$, а содержание влаги дутья увеличится на величину

$$1,3076 \cdot 12,43 = 16,253 \text{ г / м}^3 \text{ дутья}.$$

Представленные расчетные формулы и примеры расчета подтверждают возможность реализации способа связного автоматического управления подачей энергоносителей: кокса, природного газа или других топливных добавок, кислорода и влаги дутья в виде трех регуляторов соотношения, привязанных к расходу природного газа: $\text{CO}_{\text{к}}$ – «природный газ – кокс»; CO_{O_2} – «природный газ – кислород»; $\text{CO}_{\text{фд}}$ – «природный газ – влага дутья», при этом задания (уставки) регуляторам соотношения определяются на основе приведенных выше балансовых уравнений энергетического сохранения, синхронно для верха и низа доменной печи. При этом показано, что получаемые решения для соотношений $\text{CO}_{\text{к}}$, CO_{O_2} , $\text{CO}_{\text{фд}}$ одновременно удовлетворяют условиям оптимальной работы как верха, так и низа доменной печи.

При этом также показана необходимость работы указанных регуляторов соотношения в две стадии: в статическом режиме (через 4–5 ч после изменения расхода природного газа) и в динамическом режиме непосредственно после изменения расхода природного газа. При необходимости привязки управления к изменению расхода

кислорода в регуляторе соотношения достигается инверсия соотношения и ведущим расходом становится расход кислорода. После изменения расхода природного газа на базе этого регулятора устанавливаются соотношения и регуляторов «природный газ – кокс» и «природный газ – влага дутья».

При отсутствии на доменной печи подачи кислорода управление тепловой работой реализуется с помощью двух регуляторов соотношения: CO_{O_2} – «природный газ – кокс» и $\text{CO}_{\text{фд}}$ – «природный газ – влага дутья», при этом уставки также различаются для статического и динамического режимов работы регуляторов соотношения и определяются из соответствующих балансовых уравнений энергетического сохранения.

На рис. 18.52 представлено устройство для реализации данного способа. Оно включает доменную печь 1, загрузку шихты 2, подачу дутья 3, подачу в дутье природного газа (топливных добавок) 4, кислорода 5 и влаги дутья 6, выпуск чугуна и шлака 7, отвод колошниковых газов 8, датчики управляющих воздействий: расхода природного газа и топливных добавок 9, содержания кислорода в дутье 10, влажности дутья 11, расхода кокса 12, расхода дутья 13; датчики параметров состояния: температуры дутья 14, состава и температуры чугуна и шлака 15, температуры колошниковых газов 16, перепада давления 17, производительности печи 18, уровня засыпи 19, состава рудной части шихты 20, состава колошникового газа 21, влаги кокса 22; блок системы сбора и обработки информации (СОИ) 23; вычислительный блок для решения уравнений энергетического сохранения и выдачи заданий (уставок) регуляторам соотношения 24; блок корректировки коэффициентов уравнений энергетического сохранения 25; блоки ручного ввода данных 26; регуляторов соотношения: «природный газ – кокс» 27, «природный газ – кислород» 28, «природный газ – влага дутья» 29, «кислород – расход дутья» 30; блок установления параметров времени статического и динамического режимов работы регуляторов соотношений 31; блоки базы данных 32, исполнительных механизмов и регулирующих органов для изменения расходов соответственно подач кокса 33, природного газа (топливных добавок) 34, кислорода 35 и влаги дутья 36, дутья 37, а также устройство отображения информации 38 и устройство корректировки уставок регуляторам соотношений 39. При этом вы-

ходы датчиков управляющих воздействий 9, 10, 11, 12, 13 и выходы датчиков параметров состояния 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 соединены с входом блока системы сбора и обработки информации (СОИ) 23, выход вычислительного блока системы сбора и обработки информации соединен с входом вычислительных блоков 24 и 25, выход вычислительного блока 25 соединен с входом вычислительного блока 24, вычислительный блок 24 соединен с входами в регуляторы соотношений 27, 28, 29 и 30, выходы блоков 31 и 32 соединены с входом в вычислительный блок 24, выход блока базы данных 32, кроме того, соединен с входом в вычислительный блок 23, выходы регуляторов соотношений 27, 28, 29 и 30 соответственно соединены с исполнительными механизмами и регулирующими органами расходов кокса 33, кислорода 35 или природного газа 34, влаги дутья 36 и расхода дутья 37, выход блока СОИ 23 соединен с входом дисплея 38, а выход блока 39 – с входом вычислительного блока 24.

При этом устройство работает следующим образом. Датчики величин – управляющих воздействий 9, 10, 11, 12 и 13 измеряют соответственно расход природного газа (топливных добавок), содержание кислорода в дутье, влажность дутья, расходы кокса и дутья. Датчики параметров состояния 14, 15, 16, 17, 18, 19, 30, 21, 22 измеряют соответственно температуру дутья, состав и температуры чугуна и шлака, температуру колошниковых газов, перепады давления, производительность печи (оценивается дополнительным расчетом), уровень засыпи, состав рудной части шихты, состав колошниковых газа и влагу кокса. Сигналы всех этих датчиков поступают в вычислительный блок системы сбора и обработки информации 23, в котором нормируются и переводятся в числовой код. Кроме того, в этом блоке по известным методикам (см. п. 18.5.4) вычисляются индексы теплового состояния верха и низа доменной печи и оцениваются коэффициенты уравнений энергетического сохранения для управляющих воздействий (расхода кокса, природного газа, содержания кислорода в дутье и влаги дутья), возмущающих воздействий (влаги кокса, содержания железа в агломерате, температуры агломерата и др.) и параметров состояния (температуры колошника, содержания кремния в чугуне и др.). При этом используется также блок базы данных, в котором содержатся данные принятых базовых

значений расходов природного газа, кокса, кислорода, влаги дутья, а также о физических параметрах, константах и других необходимых величинах для работы вычислительного блока 23. Данные о полученных коэффициентах уравнений энергетического сохранения поступают в вычислительный блок 24, в котором на базе решений уравнений энергетического сохранения определяются соотношения между расходами «природный газ – кокс», «природный газ – кислород», «природный газ – влага дутья» и «кислород – расход дутья». При этом соотношения определяются отдельно для статического (формулы (18.160), (18.161) при наличии кислорода и (18.174), (18.175) при отсутствии кислорода) и динамического (формулы (18.162)–(18.166) при наличии кислорода и (18.171)–(18.173) при отсутствии кислорода) режимов управления. При этом ведущим расходом для установки соотношений принят расход природного газа. В случае необходимости по условиям работы печи изменения ведущего расхода можно, например, принять за ведущий расход кислорода. Тогда вычисляются значения соответствующих соотношений, в которых ведущим является расход кислорода, например, «кислород – природный газ», «кислород – кокс», «кислород – влага дутья». Время работы регуляторов соотношений в динамическом и статическом режиме управления определяется блоком 31, в котором задается соответствующее время (4–5 ч).

Данные о вычисленных соотношениях расходов поступают на задатчики регуляторов соотношений «природный газ – кокс» 27, «природный газ – кислород» 28, «природный газ – влага дутья» 29 и «природный газ – расход дутья» 30. В случае отклонения расхода природного газа (или кислорода) от заданного базового значения соответствующие регуляторы соотношений через исполнительные механизмы и регулирующие органы 33, 35, 36 и 37 приводят расходы кокса, кислорода, влаги дутья и дутья в соответствии с требуемыми соотношениями.

В соответствии с уравнениями (18.160)–(18.166), (18.171)–(18.175), (18.178)–(18.182) задаваемые соотношения могут изменяться при отклонении от базовых значений возмущающих воздействий и параметров состояния доменной плавки (влажность кокса, содержание железа в агломерате, содержание кремния в чугуне, температура колошника и т. д.). Предусмотрен и ручной ввод (корректировка) заданий регуляторам соотношений 39.

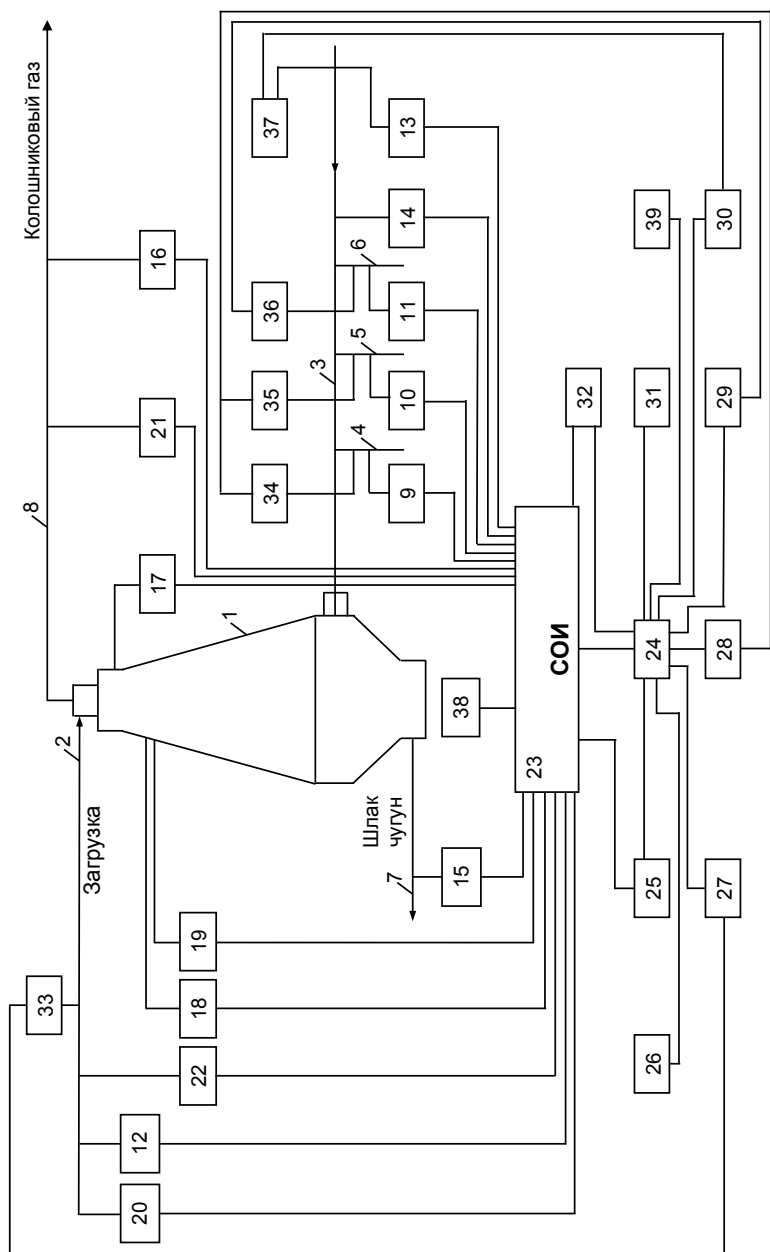


Рис. 18.52. Устройство, реализующее способ связанного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь

Отражение информации о заданиях регуляторам соотношений и текущих расходах управляющих воздействий и параметров состояний реализуется в блоке отображения информации 38.

Преимуществом способа управления доменной печью является управление основными энергоносителями – управляющими воздействиями доменной печи в автоматическом режиме без непосредственного участия оператора, что повышает точность и надежность управления, исключает возможность субъективных ошибок. Кроме того, уставки регуляторам соотношений определяются из условий эффективной работы одновременно как верха, так и низа доменной печи. Это в результате приводит к снижению расходов основных энергоносителей – кокса, природного газа (топливных добавок) и кислорода и обеспечивает протекание ровного хода доменной печи.

Отметим, что на современном уровне автоматчики для сложных объектов все более приближаются к созданию автоматизированных систем, работающих уже не только в режиме советчика, но и с замкнутым контуром. Разработанные выше соотношения могут являться основой таких систем применительно к доменным печам.

Например, в разработках фирмы «Фест Альпине» (Voest-Alpine stahl), Линц, Австрия, уже применялись экспертные системы с замкнутым контуром для доменных печей. Так, контроль расхода кокса, показаний основности, расходов дополнительных топлив (газа, угля), влажности дутья (расход пара), распределение шихты внутри печи осуществляется мгновенно и автоматически в режиме замкнутого контура, что обеспечивает более стабильное и последовательное течение процесса со снижением расхода топлива и экономией других производственных затрат – общая экономия до 16 % от стоимости чугуна.

18.5.6. Противоаварийная экспертная система доменной печи

Специфика выплавки чугуна в доменной печи и сложность происходящих при этом процессов и оборудования, несовершенство средств автоматического управления создают предпосылки для возможного нарушения так называемого «нормального хода» доменных печей нередко переходящих в аварийное состояние.

Достаточно подробный анализ неполадок и аварий в работе доменных печей проведен, в частности, в работах [18.161-18.164]. Как образно отмечено в работе [18.161], «Доменная печь остается до тех пор, как говорят, «не только вещью в себе, но даже еще и в кожухе»,

ибо, несмотря на достижения в изучении доменного процесса, совершенствование конструкций и сооружений комплекса доменного производства, в нем остается еще немало «белых пятен».

Разработка и использование именно противоаварийных экспертных систем доменной печи может быть примером создания подобных систем и для других сложных технологических и транспортных объектов. Кстати, в области ракетной техники, для которой вопросы безопасности стоят особенно остро, этим проблемам уделяется первостепенное внимание (см., например, рис. 18.44).

В основу разработанной экспертной системы диагностики аварийных ситуаций доменной печи были положены следующие признаки, основанные на анализе параметров состояния отдельных элементов доменной печи и названные «критериями диагностики аварий доменных печей» (см. табл. 18.15).

Для использования экспертной системы в темпе с процессом доменной печи разработаны алгоритмы, программное обеспечение и аппаратная реализация.

Созданная система осуществляет контроль выхода за пределы порогов значений заданного числа параметров процесса с собственным временным интервалом (с, мин, ч). Пороги задаются на основании технологических инструкций и опыта экспертов в принятых для данного измерения единицах.

Данные о технологическом процессе в виде индивидуальных файлов по каждому параметру формирует система сбора информации (СОИ) (см. рис. 18.52). В каждой записи фиксируется значение параметра и время наблюдения.

Система контроля «распаковывает» файлы СОИ, анализирует выход параметров за пороги и выдает логическое значение =, либо <, либо > в виде картинного протокола, в котором параметры представлены соответствующими им плоскими фигурами в цвете, обозначающем «норма» либо «меньше», либо «больше».

Например, в терминах трехзначной логики ($=$, $<$, $>$) реализована система контроля шести секций холодильника футеровки доменной печи. В терминах пятизначной логики ($<<$, $<=$, $=$, $>=$, $>>$) создана система контроля и предупреждения прогара 16 фурм. Протокол результатов выдается в виде изображения, на котором температура каждой фурмы отображается кружком соответствующего цвета:

- $=$ - норма - зеленый;
- $>$ - опасно - желтый;
- $>>$ - аварийно - красный и т. д.

Таблица 18.15

Основные критерии диагностики аварий доменных печей

№	Виды аварий	Главный критерий	Дополнительные критерии	Вспомогательные критерии (расчетные и др.)	Меры предупреждения
1	2	3	4	5	6
1	Прорывы горна (боковые и осевые)	Температурный перепад воды в холодильниках лещади	Температурный перепад воды в плитовых холодильниках горна	Толщина оставшейся кладки и гарнисажа	Увеличение титана в чугунах. Использование экспертной системы предотвращения аварий в горне. Методы наращивания лещади
2	Прорывы шахты	Температурный перепад воды в плитовых холодильниках шахты	Температура кожуха	Напряжение в кожухе шахты	Наружная поливка кожуха водой. Применение экспертной системы предотвращения аварий в шахте
3	Загромождение горна	Прочность кокса (M_{10})	Оползание гарнисажа. Попадание воды в горн. Высокоосновные и глиноземистые холодные шлаки	Систематическое накопление излишних продуктов плавки. Реакционная способность кокса. Накопление мелочи менее 13-18 мм. Длительная работа печи осевым ходом (ход «трубой»)	Улучшение качества кокса. Соблюдение графика выпусков. Нормальный состав шлаков и его нагрев
4	Настыли в шахте	Канальный ход (температура периферийных газов)	Поступление цинка (до 2-5 кг/т чугуна) и щелочей. Содержание мелочи в шихте	Толщина настыли (по составу газа и температуре кожуха). Содержание углекислоты по радиусу колошника. Использование ультразвука	Улучшение ровности хода. Уменьшение прихода цинка и щелочей в печь. Отсев рудной мелочи в шихте

Окончание табл. 18.15					
1	2	3	4	5	6
5	Разогрев печи	Стабильность содержания железа в шихте	Уменьшение рудной нагрузки. Увеличение кремния в чугуна	Теоретическая температура горения у фурм. Основность шлака	Увлажнение дутья. Контроль в шихте содержания железа и основности сырья
6	Похолодание печи	Влага кокса	Увеличение рудной нагрузки. Возрастание FeO в шлаке. Повышение степени прямого восстановления в печи	Количество воды в печи. Использование тепловой и химической энергии газов ($t_{\text{кол}}$, $\text{CO}_2^{\text{кт}}$)	Применение нейтронного влагомера
7	Взрывы на фурменных устройствах	Температурный перепад воды на фурмах	Оползание гарнисажа. Расход воды на фурмах	Температура торцевой части фурм. Давление пара и воды на отходящих трубах фурм	Усиление охлаждения фурм. Снижение давления дутья и остановки печи. Контроль качества изготовления воздушных фурм

18.5.7. Экспертная схема, основанная на математической модели реального времени

Математические модели и экспертные системы

Как отмечалось, современные модели доменного процесса в соответствии с представлениями о трехуровневых АСУ ТП рассматриваются как основа суперуровня управления - имитационно-оптимизационного уровня управления (см. рис. 18.1).

Разработанные в УГТУ-УПИ (УрФУ) и Институте металлургии УрО РАН математические модели доменного процесса предназначены для решения комплекса технологических задач, обеспечивающих совершенствование технологии доменной плавки, что реализуется

путем снижения «потерь» при вынужденных или целенаправленных изменениях режимных параметров. Анализ современных условий работы доменных печей России показал, что сырьевая база металлургических заводов часто не может обеспечить стабильный состав железорудных материалов. Колебания характеристик железорудных материалов, свойств кокса и параметров комбинированного дутья (возмущения) могут быть как контролируемыми, так и неконтролируемыми. В общем случае, эти колебания сопровождаются изменением взаимосвязанных процессов теплообмена, восстановления, шлакообразования движения газов и расплавов, химическим составом чугуна и удельными затратами энергии. Современные методы компенсации отклонений работы печи от заданного режима основаны на использовании математических моделей.

Как ранее отмечалось [18.2; 18.3] (см. п. 18.5.2, 18.5.4), в основах математических моделей доменного процесса, которые постоянно развиваются, лежат теория теплообмена в доменной печи и современные принципы построения систем управления технологическими процессами. В дополнение к рис. 18.36, 18.39 упрощенно комплекс доменной печи может быть представлен схемой, приведенной на рис. 18.53. Доменная печь является организованной управляемой интерактивной системой. Состояние этой системы, оцениваемое показателями состояния (комплексными показателями), определяется закономерностями основных процессов, протекающих в доменной печи, особенностями технологии, зависящей от конкретных топливно-сырьевых условий и оборудования доменной печи, включающего системы подготовки шихты, комбинированного дутья, систему отработки продуктов плавки и принятым способом управления процессом. Поэтому, при оценке эффективности доменной плавки анализируется не только процесс выплавки чугуна в доменной печи с его физическими, тепло- и массообменными закономерностями, но и взаимосвязь этих процессов с внешней средой. Развитие систем управления доменным процессом напрямую связано с созданием и применением экспертных систем. В последующих материалах приведены данные о разработке логических и логико-количественных экспертных систем для управления доменной плавкой, лишь косвенно основанных на теории и математических моделях доменных процессов.

В. Г. Лисиенко совместно с А.В. Сучковым была создана экспертная система для доменного процесса, впервые непосредственно

включающая в свой состав уже непрерывную (двумерную) математическую модель процесса*) [18.37; 18.166–18.170].

Это обстоятельство стало возможным, благодаря увеличению мощности и быстродействия компьютеров, а с другой, - благодаря развитию методов математического моделирования применительно к доменному процессу. При этом отметим большую помощь в применении для алгоритмического и программного обеспечения модели УрО РАН А.Н. Дмитриева.

Как отмечалось, в идеальном случае исключение человека из управленческого цикла было бы возможно посредством полной автоматизации управления работой доменной печи, однако такая система пока не реализована. Требовалось разработать на основе существующих моделей, описывающих основные процессы в доменной печи, процедуру, позволяющую формирование рекомендаций для лица, принимающего решения (ЛПР), отвечающего за течение и результат процесса (в данном случае мастера доменной печи), о выборе тех или иных управляющих воздействий.

Окончательное решение при этом, конечно, остается за мастером. Эти процедуры, реализованные с использованием компьютерной техники, и получили название экспертные системы или системы поддержки принятия решений (СППР).

СППР – это интерактивные автоматизированные системы, помогающие ЛПР использовать данные и модели для решения так называемых слабоструктурированных проблем. Предлагаемая система поддержки принятия решений может быть рассмотрена как совокупность трех составляющих – это процедура формирования значений управляющих воздействий, реализующий ее алгоритм и программа «Советчик мастера доменной печи».

В данном случае речь идет об экспертной системе высокого уровня, основанной на непосредственном использовании математических моделей в темпе с процессом.

* Сучков А.В. Анализ и совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи: автореф. на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.В. Сучков. – Томск, 2010.

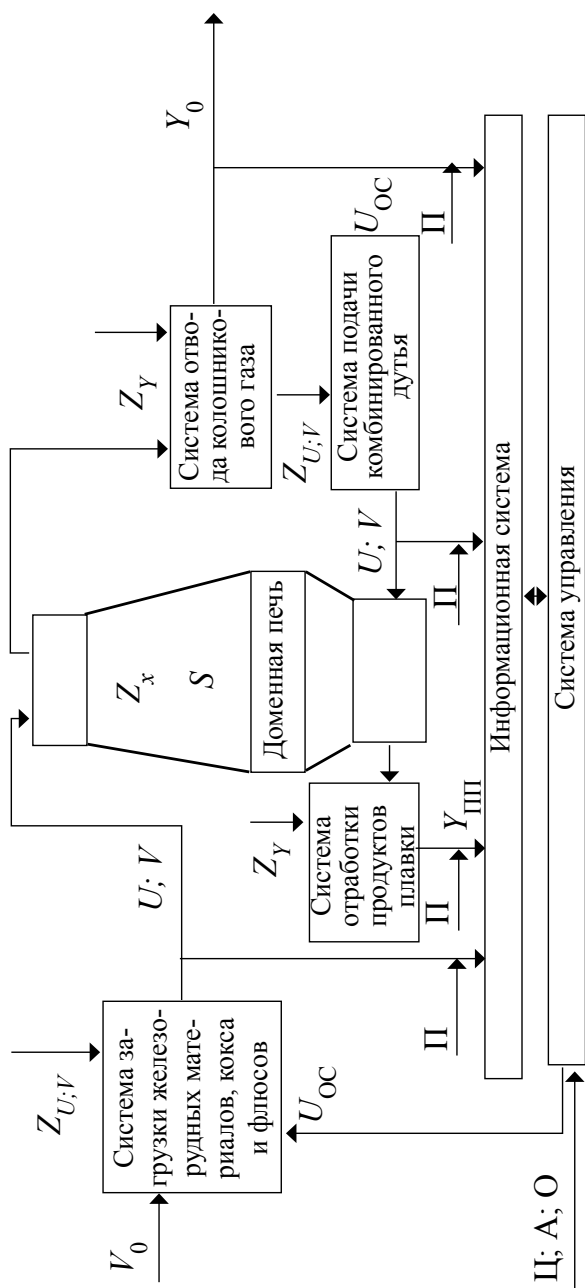


Рис. 18.53. Доменная печь как управляемая технологическая система:

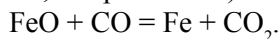
V , U , Y – отчетные данные о параметрах и показателях работы доменной печи; V_0 – вектор заданных режимных параметров; U – управляющие воздействия; U_{OC} – управляющее воздействие (обратная связь); Y – выходные показатели процесса; Y_{III} – выходные показатели продуктов плавки; Y_0 – заданный вектор выходных переменных; S – параметры состояния; Z_x – неконтролируемые изменения внутренних характеристик процесса; $Z_{U;V}$ – неконтролируемые изменения входных и управляющих воздействий; Z_Y – потери чугуна со скрапом и шлаком, вынос колосниковой пыли; $Z_{U;Y}$ – неконтролируемые изменения выходных и управляющих воздействий; Π – помехи (факторы, искажающие информацию); Π – целевая функция управления; A – алгоритм управления; O – ограничения

Использованная в экспертной системе математическая модель доменного процесса

Разработанная модельно-количественная экспертная система [18.15; 18.37; 18.67; 18.68; 18.164-18.170] базировалась на органическом сочетании балансовой математической модели доменного процесса в разработке Института металлургии УрО РАН и представлении об индексах верха и низа доменной печи в разработке УПИ (УГТУ - УПИ, УрФУ).

В основу балансовой математической модели заложены следующие основные представления. Теплообмен в определенной области доменной печи завершен, т. е. перепад температур между газом и шихтой достаточно мал (см. рис. 18.54) [18.36; 18.67; 18.68; 18.101-18.106].

При этом на стадии восстановления магнетита (Fe_3O_4) реакция восстановления вюстита (FeO) стремится к термодинамическому равновесию (точки С и С', см. рис. 18.55):



Предположение о термодинамическом равновесии сделано на основании фактически реализуемого зонального режима восстановления оксидов железа (при котором восстановление магнетита и вюстита происходит одновременно) и наличия реакций регенерации CO и H_2 .

Расчеты в модели ведутся без задания степени прямого восстановления и температуры колошникового газа в качестве исходных данных.

В основе расчетов лежат четыре основных соотношения.

Условие термодинамического равновесия нижней зоны печи:

$$K_{\text{CO}} = P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}} = \eta_{\text{CO}} / (1 - \eta_{\text{CO}}), \quad (18.187)$$

где K_{CO} – константа равновесия по реакции (18.1), доли ед.,

P_{CO_2} , P_{CO} – парциальные давления CO_2 и CO , доли ед.;

η_{CO} – степень использования CO .

Материальный баланс углерода в нижней зоне печи:

$$C_{\text{к}} + C_{\text{доб}} = C_{\text{ф}} + C_{\text{д}} + C_{\text{ч}} + C_{\text{кп}}, \quad (18.188)$$

где $C_{\text{к}}$ и $C_{\text{доб}}$ – количество углерода, поступающего с коксом и добавками к дутью;

C_{ϕ} – количество сгорающего у фурм углерода;
 C_d – расход углерода на прямое восстановление;
 $C_{\text{ч}}, C_{\text{кп}}$ – углерод чугуна и колошниковой пыли.

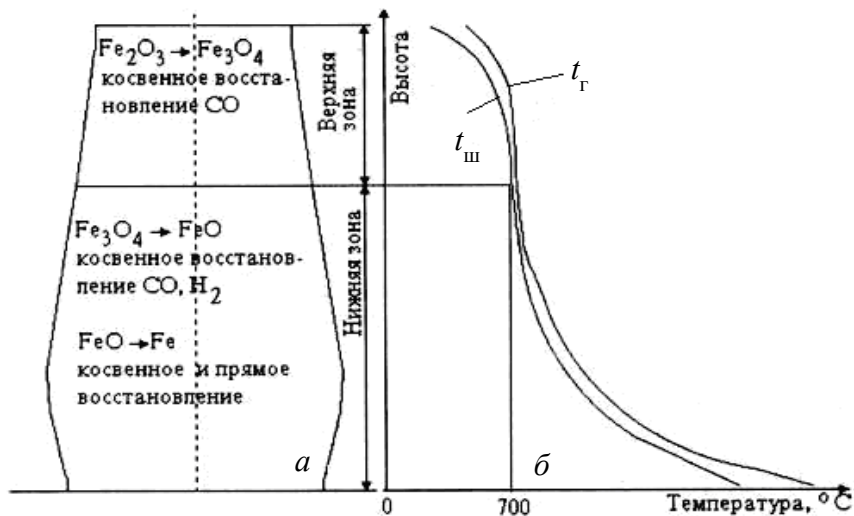


Рис. 18.54. Схема деления доменной печи на зоны – а и распределение температур шихты $t_{\text{ш}}$ и газа $t_{\text{г}}$ по высоте – б

Тепловой баланс нижней зоны печи:

$$q_{\text{д}} + q_{\text{ш}}^{\text{H}} + q_{\text{с}} + q_{\text{CO}}^{\text{H}} + q_{\text{H}_2} + q_{\text{доб}} + q_{\text{впт}} = q_{\text{пв}} + q_{\text{уг}}^{\text{H}} + q_{\text{ч}} + q_{\text{шл}} + q_{\text{H}_2\text{O}} + q'_{\text{доб}} + q_{\text{изв}} + q_{\text{пот}}^{\text{H}}, \quad (18.189)$$

$$q_{\text{пв}} = q_{\text{Fe}}^{\text{H}} + q_{\text{Mn, Si, P}}, \quad (18.190)$$

где $q_{\text{д}}$ – тепло, вносимое воздушным дутьем, кДж/т чугуна;

$q_{\text{ш}}^{\text{H}}$ – тепло, вносимое шихтой, кДж/т чугуна;

$q_{\text{с}}, q_{\text{CO}}^{\text{H}}, q_{\text{H}_2}$ – приход тепла, за счет окисления, соответственно, С, СО, H_2 , кДж/т чугуна;

$q_{\text{доб}}$ – тепло, вносимое добавками дутья, кДж/т чугуна;

$q_{\text{впт}}$ – высокопотенциальное тепло, кДж/т чугуна;

$q_{\text{Fe}}^{\text{H}}, q_{\text{Mn, Si, P}}$ – расход теплоты на диссоциацию оксидов железа и других оксидов, кДж/т чугуна;

$q_{\text{уг}}^{\text{H}}$, $q_{\text{ч}}$, $q_{\text{шл}}$ – теплота, уносимая, соответственно, газами, чугуном, шлаком, кДж/т чугуна;

$q_{\text{H}_2\text{O}}$, $q'_{\text{доб}}$, $q_{\text{изв}}$ – теплота, затрачиваемая на разложение, соответственно, влаги дутья, добавок к дутью, известняка, кДж/т чугуна;

$q_{\text{пот}}^{\text{H}}$ – потери теплоты, кДж/т чугуна.

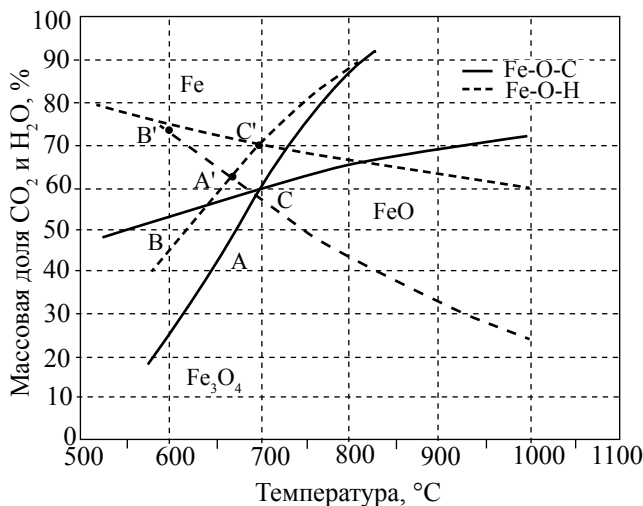


Рис. 18.55. Диаграмма равновесия Fe-O-C и Fe-O-H

Тепловой баланс верхней зоны:

$$q_{\text{ш}}^{\text{B}} + q_{\text{CO}}^{\text{B}} + q_{\text{вг}} + q'_{\text{пыль}} = q_{\text{Fe}}^{\text{B}} + q_{\text{уш}} + q_{\text{уг}}^{\text{B}} + q_{\text{пот}}^{\text{B}} + q_{\text{ив}} + q''_{\text{пыль}}, \quad (18.191)$$

здесь $q'_{\text{пыль}}$, $q''_{\text{пыль}}$ – соответственно, приход и потери тепла с пылью, кДж/т чугуна;

$q_{\text{ш}}^{\text{B}}$, $q_{\text{вг}}$ – теплота, вносимая шихтой и газами соответственно, кДж/т чугуна;

q_{CO}^{B} – приход теплоты за счет окисления CO , кДж/т чугуна;

q_{Fe}^{B} – потери теплоты, за счет диссоциации оксидов железа, кДж/т чугуна;

$q_{\text{уш}}$, $q_{\text{уг}}^{\text{B}}$ – теплота, уносимая шихтой и газами соответственно, кДж/т чугуна;

$q_{\text{пот}}^{\text{B}}$ – потери теплоты, кДж/т чугуна;

$q_{\text{ив}}$ – потери теплоты при испарении влаги шихты, кДж/т чугуна.

Решение системы уравнений, составленной на основе данных соотношений, позволяет определить расход кокса, углерода на прямое восстановление и расход поступающего с воздушным дутьем кислорода.

Определенные таким образом показатели доменной плавки являются предельно достижимыми (минимальными) при заданных параметрах шихты и дутья. Применение фактических степеней использования газа в печи вместо равновесных позволяет определить фактические показатели доменной плавки.

Для определения показателей плавки с помощью модели она должна быть настроена на условия работы конкретной доменной печи. Для этого необходимо задать:

- физические размеры печи;
- параметры шихты;
- параметры чугуна;
- параметры топлива, подаваемого с дутьем;
- условия равновесия.

Параметры первой группы являются постоянными для данной печи. Вторая группа включает параметры кокса и соотношение оксидов железа в железорудной части шихты, параметры известняка, если осуществляется его подача; при работе в условиях стабильных поставок сырья и кокса эти параметры изменяются мало. Величины третьей группы зависят от вида выплавляемого чугуна, они должны быть изменены при переходе на выплавку чугуна другого состава. К параметрам четвертой группы относятся характеристики природного газа, пылеугольного топлива, мазута (они настраиваются при наличии технологий подачи соответствующих видов топлива). Последняя группа содержит настройки зоны, в которой наблюдается равновесие по реакции восстановления вюститита, эти параметры (в первую очередь это степени использования газов CO и H_2) являются коэффициентами адаптации модели и должны быть подобраны так, чтобы фактические и расчетные показатели плавки совпадали.

Приведем результаты использования данной балансовой модели, разработанной в Институте металлургии УрО РАН (по данным её авторов). Так, в рамках оценки эффективности работы печей исследовались показатели плавки для 12 доменных печей в течение длительного срока. Были выявлены резервы для снижения расхода кокса на большинстве печей. В рамках оценки эффективности мероприятий,

направленных на снижение расхода кокса, был рассчитан эффект от понижения массовой доли монооксида железа в агломерате для металлургического завода им. А.К. Серова (где это позволило снизить расход кокса на 7 кг/т чугуна и повысить производительность на 2,5 %) и Карагандинского металлургического комбината (где снижение расхода кокса на доменных печах № 3 и № 4 составило 10 кг/т чугуна). С помощью рассматриваемой модели рассчитывались коэффициенты компенсации (т. е. степени влияния тех или иных управляющих воздействий на показатели плавки) для различных условий. В рамках прогнозирования влияния различных энергоносителей и сырьевых материалов на показатели доменной плавки разработаны проектные предложения по опытным плавкам для доменной печи № 5 металлургического завода им. А.К. Серова. Рассчитаны варианты с применением высокопотенциального тепла для нагретого до 2100 °С дутья и конвертированного газа.

Таким образом, использование модели для условий разных печей и получение практически значимых результатов подтверждает ее универсальность и адекватность реальным процессам.

Можно сделать вывод о том, что большая часть параметров и переменных, список которых сформирован выше с помощью системного подхода, присутствует в модели. При этом часть величин, таких как уровень засыпи, давление под колошником, интегральная характеристика теплового состояния верхней зоны, оптимальная величина теплоты, приходящей в нижнюю зону, отсутствуют в данной модели. Первые две величины обычно поддерживаются на заданном уровне локальными системами автоматического регулирования, две вторые могут быть рассчитаны и внесены в модель.

С целью обеспечения возможности тепловой оптимизации доменного процесса автором было предложено дополнить модель расчетом таких комплексных показателей как индексы теплового состояния доменной печи. Они характеризуют распределение теплоты в объеме доменной печи и позволяют определять оптимальное количество тепла для нормального хода процесса. Кроме того, изменение индекса теплового состояния верхней зоны позволяет оценивать перепад давлений в этой зоне и связанную с ним опасность верхнего подвисания шихты. С учетом данной модернизации модели ее можно считать удовлетворяющей требованию полноты используемых параметров и переменных.

Помимо полноты набора параметров для моделей, безусловно, должны рассматриваться и другие характеристики, такие как:

- время, необходимое для вычислений (при наличии программной реализации);
- простота настройки;
- практическая опробованность и доказанная адекватность для различных условий.

Исходя из результатов сравнения известных математических моделей, приведенного выше анализа полноты набора параметров и переменных и значительного практического опыта использования модели, подтверждающего её адекватность, для создания системы поддержки принятия решений и была выбрана рассмотренная балансовая модель, разработанная в Институте металлургии УрО РАН, дополненная расчетами и анализом индексов теплового состояния верха и низа доменной печи.

Программная реализация балансовой модели и алгоритмов вычисления индексов теплового состояния

Тепловое состояние является одним из основных факторов, во многом определяющих количественные и качественные показатели плавки. В соответствии с концепцией теплообменных процессов, предложенной Б.И. Китаевым, рабочее пространство печи делят на две зоны: условно верх и низ печи.

Как отмечалось, за основу математического обеспечения в данной модельно-количественной экспертной системе была принята балансовая модель Института металлургии УрО РАН [18.101-18.105], дополненная индексами теплового состояния печи в известной разработке школы Б.И. Китаева (УПИ, УГТУ-УПИ, УрФУ) [18.2; 18.15; 18.67; 18.68; 18.133- -18.138; 18.168; 18.169].

Балансовая модель. Исходная балансовая модель имеет 101 входную величину, их значения содержатся в файле формата MS Excel. Входными величинами, в частности, являются параметры:

- природного газа;
- мазута;
- угольной пыли;
- кокса;

- чугуна;
- шлака;
- известняка;
- дутья;
- железорудной части шихты;
- степени использования газов;
- физические параметры печи.

Результатом расчета по модели являются 48 величин, в их числе:

- показатели доменной плавки (расход кокса, дутья, степень прямого восстановления, температура фурменного очага и другие);
- характеристики колошникового газа;
- тепловой баланс нижней и верхней зоны.

Расчет выходных показателей осуществляется при помощи последовательного решения уравнений, программа, реализующая его, состоит из основного блока, в котором реализуется общий алгоритм, и двенадцати подпрограмм-функций, в которые вынесен расчет некоторых параметров (в частности, средних теплоемкостей газов и составляющих шихты для верхней части печи). Реализована исходная программа на языке программирования Basic; код программы был переведен на язык Delphi, который обладает большими возможностями для последующей модернизации и использования в качестве основы для системы поддержки принятия решений.

Программа, реализующая балансовую модель печи, модернизирована путем внесения в нее модулей с математическими выражениями для расчета индексов теплового состояния. В результате количество выходных показателей увеличено на два. Набор входных параметров расширен за счет добавления среднего диаметра кусков шихты $d_{ш}$, и пяти параметров для расчета $Q_{\text{опт}}$ (см. рис. 18.56). Выполнено окно настроек, куда вводятся данные величины. Остальные параметры, задаваемые в данном окне, относятся к программному совету, созданной на основе балансовой модели.

Значения рассчитанных индексов выводятся вместе с показателями теплового баланса.

Рис. 18.56. Окно настроек программы, реализующей математическую модель

Алгоритмы расчета индексов теплового состояния верхней и нижней зон доменной печи. Тепловое состояние является одним из основных факторов, определяющих количественные и качественные показатели плавки. Как уже отмечалось, в соответствии с концепцией теплообменных процессов, предложенной Б.И. Китаевым [18.67; 18.68; 18.133-18.139], рабочее пространство доменной печи делят на две относительно самостоятельные тепловые зоны - верхнюю и нижнюю [18.2; 18.15; 18.168; 18.169], (см. рис. 18.54). При этом условная граница между ними проходит по изотермическим поверхностям с температурами газа и шихты, соответственно t_0 и $t_{ш0}$, которые характеризуют начало заметного развития эндотермической реакции восстановления двуоксида углерода. Для комплексной количественной оценки теплового состояния верхней и нижней части печи были введены соответствующие индексы, которые могут использоваться для анализа текущей ситуации в доменном процессе и для расчета значений управляющих переменных.

В связи с непосредственным использованием индексов теплового состояния в алгоритмическом и программном обеспечении данной модельной экспертной системы, рассмотрим их несколько подробнее. При этом еще раз заметим, что именно идея органической связи индексов теплового состояния с моделью УрО РАН и позволила авторам создать рассматриваемую модельную экспертную систему доменной печи реального времени.

Индекс теплового состояния верхней зоны i_v характеризует развитие процессов косвенного восстановления оксидов железа и отражает комплекс условий, от которых зависят основные показатели доменного процесса – производительность и удельный расход кокса. Кроме того, развитие тепловых процессов в верхней зоне обуславливает изменение перепада давлений по высоте печи, поэтому контроль за величиной i_v позволяет прогнозировать ход печи и своевременно определять критические условия, связанные с опасностью верхнего подвисания.

Оптимальное значение индекса верха может находиться, как показывает опыт работы доменных печей по современной технологии, в пределах от 0,55 до 0,80 в зависимости от значений конструктивных и режимных параметров работы конкретных доменных печей. Более низкие значения непригодны с технологической

точки зрения, так как не обеспечиваются температурные условия для развития восстановительных процессов. Значения $i_b > 0,8$ соответствуют температурному полю с повышенным расходом топлива, поэтому также считаются неприемлемыми. Оптимальное значение i_b соответствует такому распределению температур в шахте, при котором достигается максимальная производительность. Значительное влияние на положение оптимума индекса верха оказывает восстановимость железорудной части шихты и ее механическая прочность – при повышении этих показателей оптимальное значение i_b снижается.

Для нахождения оптимального значения i_b необходимо использование фактических данных. На основании статистических данных находится зависимость производительности доменной печи от значений индекса верха для данных условий. Как следует из работ школы Б.И. Китаева [18.67; 18.68; 18.133–18.139], эта зависимость имеет экстремум (см. рис. 18.49), следовательно, может быть определено наилучшее значение индекса.

Химический состав чугуна определяется **тепловым состоянием нижней зоны доменной печи** i_n и химическим составом загружаемой шихты. По характеру изменения индекса i_n можно прогнозировать содержание кремния в чугуне на очередном выпуске, а также принимать решения о применении малоинерционных управляющих воздействий «снизу» (температура и влажность дутья, количество подаваемого кислорода и природного газа).

Оптимальное значение индекса теплового состояния низа доменной печи определяется, прежде всего, требуемым составом чугуна и соответствующим тепловым состоянием печи, необходимым для его получения. При этом (см. соотношения (18.115)–(18.117), желаемое значение $i_n = 1$; величина $Q_{\text{опт}}$, рассчитанная в соответствии с уравнением (18.115), является ориентировочной, поэтому оптимальные значения i_n могут находиться в некотором узком диапазоне, включающем 1.

Использование индексов теплового состояния в качестве выходных переменных модели для расчетов имеет некоторые преимущества по сравнению с использованием показателей плавки таких как производительность, расход кокса, содержание кремния в чугуне. Во-первых, это возможность оценивать верхний перепад

давлений в печи – наблюдается положительная корреляция значений этого параметра с величиной i_v . Во-вторых, величины индексов теплового состояния раскрывают причины изменений таких показателей, как содержание кремния в чугунах и упомянутого перепада давлений. Отметим, что при изменении значений i_v и i_n соответствующие изменения показателей происходят через некоторое время (около 2 часов). Таким образом, появляется больше возможностей для прогнозирования параметров доменного процесса.

В балансовой математической модели УрО РАН индексы теплового состояния отсутствуют. При этом оказывается, что в выражениях для нахождения индексов теплового состояния присутствуют исходные величины, учитываемые в данной модели (как в качестве входных, так и в качестве расчетных), что позволяет совместить вычисление индексов верха и низа печи с нахождением показателей плавки, производимым в модели. Проблема состоит в необходимости расчета дополнительных величин (например, средней площади сечения шахты печи, удельного расхода рудных материалов) и приведения имеющихся величин к необходимому виду с использованием данных модели (например, из количества вещества (моль) требуется получить массу (кг), расход материалов и газов в единицу времени необходимо преобразовать в удельный (приходящийся на тонну чугуна), единицы измерения перевести в другие (сутки в минуты, калории в джоули) и т. д. Отметим, что связанная с этими обстоятельствами некоторая модернизация балансовой математической модели описана в работе [18.169].

Рассмотрим выражения для определения численного значения индекса теплового состояния верхней зоны печи. Технико-экономические показатели плавки во многом определяются тепловым состоянием шахты печи, точнее, ее температурным полем, которое является отображением развития взаимосвязанных теплообменных, восстановительных и механических процессов доменной плавки. Как отмечалось, для количественной оценки установившегося температурного поля верхней зоны печи и был предложен безразмерный комплексный показатель i_v . Величина этого показателя, и названного индексом температурного поля, характеризует среднюю температуру прогрева шихтовых материалов в пределах верхней зоны $t_{ш}$, отнесенную к температуре газа на границе раздела между зонами t_0 .

Выражение для индекса верха i_v и определение величины i_v через текущие параметры хода доменного процесса приведены в п. 18.5.3 (см. уравнения (18.112) и (18.113).

Конкретизируем величины, входящие в формулы (18.112)–(18.114). Величина $t_{ш}$ задается во входных данных к модели, поэтому является известной, а величина t_k рассчитывается в модели, то есть для использования выражений (18.112)–(18.114) необходимо выразить величины S , α_v , W_r , $W_{ш}$, H_v через известные параметры.

Средняя площадь сечения шахты S , используемая в выражении (18.113), может быть найдена как среднее арифметическое значение между площадью сечения распара и колошника:

$$S = (\pi \cdot d_p^2 + \pi \cdot d_k^2)/2. \quad (18.192)$$

Величина d_p задается в исходных данных к модели, диаметр колошника может быть выражен через полезный объем печи и известный диаметр горна d_r с помощью методов приближенного расчета размеров печи Н.К. Леонидова [18.172]:

$$d_k = 0,593 \cdot V^{0,3}, \quad (18.193)$$

где V – величина полезного объема печи, m^3 ;

При этом величина диаметра горна также выражается через полезный объем:

$$d_r = 0,342 \cdot V^{0,4}. \quad (18.194)$$

Из уравнений (18.193), (18.194) получено

$$d_k = 0,593 \cdot \left(\frac{d_r}{0,342} \right)^{0,75}. \quad (18.195)$$

Итоговая формула для расчета средней площади сечения шахты, выраженная через известные в модели параметры, согласно уравнениям (18.192), (18.195) примет вид:

$$S = \frac{\pi}{2} \cdot (1,76 \cdot d_r^{3/2} + d_p^2). \quad (18.196)$$

Средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа α_v , необходимый для нахождения значения в формуле (18.113), может быть рассчитан по

следующей формуле, согласно [18.135]:

$$\alpha_v = 0,259 \cdot \frac{c_r^{1/3} \cdot \lambda_r^{2/3}}{d_{ш}^{1,1} \cdot v_r^{0,57}} \cdot \left(\frac{V_r}{60 \cdot S} \right)^{0,9} \left(1 + \frac{t_k}{273} \right)^{0,57}, \quad (18.197)$$

где c_r – истинная удельная теплоемкость колошникового газа, кДж/(м³·°C);

λ_r – теплопроводность колошникового газа, Вт/(м·°C);

v_r – кинетическая вязкость колошникового газа, м²/с;

$d_{ш}$ – средневзвешенный диаметр кусков шихтовых материалов, м;

V_r – выход сухого колошникового газа, м³/мин. В модели рассчитывается удельный выход газа на тонну чугуна $V_{грасч}$, следовательно:

$$V_r = V_{грасч} \cdot P_p, \quad (18.198)$$

где P_p – производительность печи; т чугуна/мин.

Величины c_r , λ_r , v_r выражаются через известные параметры [18.135]:

$$c_r = 1,283 + 0,000214 \cdot t_k + (4,3 + 0,0073 \cdot t_k) \cdot CO_2 \cdot 10^{-3}, \quad (18.199)$$

где CO_2 – содержание CO_2 в колошниковом газе, % (выходная для модели величина).

$$\lambda_r = (19,4 + 1,826 \cdot H_2 + 0,0073 \cdot t_k) \cdot 10^{-3}, \quad (18.200)$$

где H_2 – содержание H_2 в колошниковом газе, % (выходная для модели величина).

$$v_r = (1,456 \cdot t_k + 5,14 \cdot H_2 - 35,43) \cdot 10^{-7}. \quad (18.201)$$

Значение величины $d_{ш}$ является входным параметром, который добавлен к исходным данным для модели.

Теплоемкость потока газа на колошнике W_r , необходимая для расчета значений выражений (18.113) и (18.114), может быть определена по формуле:

$$W_r = 16,67 \cdot c_r \cdot V_r. \quad (18.202)$$

Множитель 16,67 применяется для перевода единиц теплоемкости из кДж/мин в Дж/с. Остальные переменные были найдены выше.

Для расчета теплоемкости потока шихты на колошнике, используемой для нахождения значения выражения (18.113), можно воспользоваться формулой [18.135]:

$$W_{\text{шк}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{ши}} \cdot G_{\text{ши}} , \quad (18.203)$$

где $c_{\text{ши}}$ – теплоемкость i -го компонента шихты, кДж/(кг·°С);

$G_{\text{ши}}$ – расход i -го компонента шихты, кг/мин;

Для шихты, состоящей из рудной части (в дальнейшем – руды), кокса и известняка, выражение (18.203) может быть записано следующим образом:

$$W_{\text{шк}} = 16,67 \cdot (c_{\text{р}} \cdot G_{\text{р}}^{\text{уд}} + c_{\text{и}} \cdot G_{\text{и}}^{\text{уд}} + c_{\text{к}} \cdot G_{\text{к}}^{\text{уд}}) \cdot P_{\text{р}} , \quad (18.204)$$

где $c_{\text{р}}$, $c_{\text{и}}$, $c_{\text{к}}$ – теплоемкости руды, известняка и кокса соответственно, кДж/(кг·°С);

$G_{\text{р}}^{\text{уд}}$, $G_{\text{и}}^{\text{уд}}$, $G_{\text{к}}^{\text{уд}}$ – удельный расход руды, известняка и кокса соответственно, кг/т чугуна.

В модели присутствуют величины содержания железа в рудной части шихты и в чугуне в качестве входных данных. Теплоемкости составляющих шихты и удельный расход руды необходимо найти.

Если считать, что все железо переходит из руды в чугун, справедливо равенство:

$$m_{\text{р}} \cdot \text{Fe}_{\text{р}} = m_{\text{ч}} \cdot \text{Fe}_{\text{ч}} , \quad (18.205)$$

где $m_{\text{р}}$ – масса рудных материалов, кг; $m_{\text{ч}}$ – количество чугуна, получаемого из рудных материалов массой $m_{\text{р}}$, т; $\text{Fe}_{\text{р}}$ и $\text{Fe}_{\text{ч}}$ – содержание железа в руде и чугуне соответственно, %.

Если учесть, что в чугун переходит около 99,5 % железа руды (согласно [18.172]), то удельный расход руды, равный отношению $m_{\text{р}}/m_{\text{ч}}$, в соответствии с (18.205), составит:

$$G_{\text{р}}^{\text{уд}} = \frac{\text{Fe}_{\text{ч}}}{0,995 \cdot \text{Fe}_{\text{р}}} , \quad (18.206)$$

Значения теплоемкостей $c_{\text{р}}$, $c_{\text{и}}$, $c_{\text{к}}$ могут быть выражены через аналогичные величины, рассчитываемые в модели, для этого необходимо приведение размерности ккал/(кг моль·град) к кДж/(кг·град). Для расчета теплоемкости руды необходимо также учесть наличие в ней различных компонентов и их количественное соотношение.

Выражения для расчета удельной теплоемкости известняка, кокса, руды:

$$c_{\text{и}} = \frac{4,184 \cdot c_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaCO}_3}}, \quad (18.207)$$

$$c_{\text{к}} = \frac{4,184 \cdot c_{\text{C}}}{M_{\text{C}}}, \quad (18.208)$$

$$c_{\text{р}} = 4,184 \cdot \left(\frac{c_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot \text{Fe}_3\text{O}_{4\text{ш}}}{M_{\text{Fe}_3\text{O}_4}} + \frac{c_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_{3\text{ш}}}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + \frac{c_{\text{FeO}} \cdot \text{FeO}_{\text{ш}}}{M_{\text{FeO}}} \right), \quad (18.209)$$

где c_{CaCO_3} , $c_{\text{с}}$, $c_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$, $c_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$, c_{FeO} – удельные теплоемкости известняка, углерода;

Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , FeO соответственно, ккал/(кг моль·°C);

M_{CaCO_3} , M_{C} , $M_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$, $M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$, M_{FeO} – молярная масса приведенных веществ, равная соответственно 100, 12, 232, 160, 72, кг/ кг моль;

$\text{Fe}_3\text{O}_{4\text{ш}}$, $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{ш}}$, $\text{FeO}_{\text{ш}}$ – содержание железа в руде в виде соответствующего оксида, доли ед.;

4,184 – коэффициент для перевода из ккал в кДж.

Величины c_{CaCO_3} , $c_{\text{с}}$, $c_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$, $c_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$, c_{FeO} рассчитывается в модели.

Для расчета средней высоты верхней тепловой зоны $H_{\text{в}}$, которая входит в выражение (18.113), используется выражение (в соответствии с [18.173]):

$$H_{\text{в}} = \frac{3 \cdot \omega \cdot c_{\text{в}}}{k_{\text{в}} \cdot \left(1 - \frac{W_{\text{шк}}}{W_{\text{г}}}\right)}, \quad (18.210)$$

где ω – скорость схода шихты, м/ч;

$c_{\text{в}}$ – теплоемкость насыпного 1 м³ шихты, кДж (кг · °C) (ккал /°C·м³);

$k_{\text{в}}$ – суммарный объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·°C) (ккал/(м³·ч·°C)).

Данные величины могут быть рассчитаны. Величина ω вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{V_{\text{ш}} \cdot P}{24 \cdot S}, \quad (18.211)$$

где $V_{\text{ш}}$ – объем шихты на 1 т чугуна, м³;
 P – производительность печи, т/сутки.

Величина $V_{\text{ш}}$ принимается равной 2,3 м³/т чугуна, значение P задается в данных к модели.

Параметр c_v , присутствующий в соотношении (18.210) находится как:

$$c_v = \frac{W_{\text{шк}}}{W_{\text{Г}}} \cdot \frac{V_{\text{Грасч}} \cdot c_{\text{Г}}}{V_{\text{ш}}}. \quad (18.212)$$

Все величины, входящие в (18.112) рассмотрены выше.

Величина k_v рассчитывается из выражения [18.173]:

$$\frac{1}{k_v} = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{d^2}{36 \cdot \lambda}, \quad (18.213)$$

где λ – коэффициент теплопроводности куска, Вт/(м·°C). Эта величина различается для разных компонент шихты (составляя для кокса 0,407 Вт/(м·°C), для агломерата 0,52 Вт/(м·°C)), поэтому находится результирующая средняя величина для шихты в целом.

Таким образом все величины, необходимые для расчета значения индекса теплового состояния верхней зоны печи при помощи балансовой модели, найдены.

Алгоритм расчета значения индекса теплового состояния верхней зоны с использованием данных балансовой модели включает в себя последовательное нахождение:

- 1) истинной удельной теплоемкости колошникового газа $c_{\text{Г}}$;
- 2) теплопроводности колошникового газа $\lambda_{\text{Г}}$, согласно (18.200);
- 3) кинетической вязкости колошникового газа $\nu_{\text{Г}}$ по выражению (18.20);
- 4) выхода сухого колошникового газа $V_{\text{Г}}$ в соответствии с (1.198);
- 5) средней площади сечения шахты S по формуле (18.196);
- 6) среднего для верхней зоны печи объемного коэффициента теплообмена между потоками шихты и газа α_v согласно (18.197);
- 7) теплоемкости потока газа на колошнике $W_{\text{Г}}$ по выражению (18.202);

- 8) удельного расхода руды $G_p^{уд}$ в соответствии с (18.206);
- 9) удельных теплоемкостей известняка $c_{и}$, кокса $c_{к}$ и руды $c_{р}$ по выражениям (18.207)–(18.209);
- 10) теплоемкости потока шихты на колошнике $W_{ш}$ по формуле (18.204);
- 11) суммарного объемного коэффициента теплопередачи k_v согласно (18.213);
- 12) теплоемкости насыпного 1 м^3 шихты c_v по выражению (18.212);
- 13) скорости схода шихты ω по формуле (18.211);
- 14) средней высоты верхней тепловой зоны H_v согласно (18.210);
- 15) среднего для верхней зоны печи отношения теплоемкостей потоков шихты и газа m (см. формулу (18.113));
- 16) показателя интенсивности теплообмена в верхней части доменной печи B (см. формулу (18.113));
- 17) индекса теплового состояния верхней зоны доменной печи i_v по выражению (18.113).

Методика расчета индекса теплового состояния нижней зоны доменной печи. Для анализа и прогнозирования хода плавки и количественной оценки теплового состояния нижней зоны печи как отмечено был использован показатель i_n , расчет которого основан на анализе теплового баланса нижней зоны печи.

Индекс теплового состояния нижней зоны печи i_n вычисляется как отношение [18.67; 18.68; 18.133–18.139]

$$i_n = \frac{Q_p}{Q_{\text{опт}}}.$$

Значение параметра Q_p отражает совместное влияние всех контролируемых теплотехнических факторов на ход плавки, что позволяет оценивать текущее состояние процесса и прогнозировать его развитие. Об отклонениях от заданного режима можно судить, если известно достоверное значение величины $Q_{\text{опт}}$. В общем случае оно является параметром настройки модели и ориентировочное значение $Q_{\text{опт}}$ может быть найдено по уравнению, согласно [18.135]:

$$Q_{\text{опт}} = [0,69 \cdot (t_{\text{ч}} - 25) + 295] \cdot 10^3 + \text{Ш} \cdot c_{\text{ш}} \cdot t_{\text{ш}} - Q_{\text{обр.шл}} + 226500 \cdot [\text{Si}]_3 + 52250 \cdot [\text{Mn}]_3 + 263000 \cdot [\text{P}]_3 + 104500 \cdot d_{\text{горн}} / P_{\text{зад}}, \quad (18.214)$$

где $t_{\text{ч}}$ и $t_{\text{ш}}$ – температура чугуна и шлака на выпуске, °C;

Π – удельный выход шлака, кг/ т чугуна;
 $c_{\text{ш}}$ – средняя удельная теплоемкость шлака, кДж/(кг·°C);
 $[\text{Si}]_3, [\text{Mn}]_3, [\text{P}]_3$ – заданные содержания соответственно кремния, марганца и фосфора в чугуне, %;

$d_{\text{горн}}$ – диаметр горна печи, м;

$P_{\text{зад}}$ – заданная суточная производительность печи, тыс. т/сутки;

$Q_{\text{обр.шл}}$ – теплота образования шлака, кДж/т чугуна.

Величины $t_{\text{ч}}$, $t_{\text{ш}}$, $d_{\text{горн}}$ являются входными величинами для модели. Так как необходимы желаемые величины Π , $[\text{Si}]_3$, $[\text{Mn}]_3$, $[\text{P}]_3$, $P_{\text{зад}}$, то их значения не берутся из расчетов (значения в модели принимаются как «фактические»), а задаются отдельно, перед началом расчетов.

Величину $c_{\text{ш}}$ можно принять постоянной со значением 0,781 кДж/(кг °C), [18.174]. $Q_{\text{обр.шл}}$ может быть рассчитана в соответствии с [18.175; 18.176]:

$$Q_{\text{обр.шл}} = 1128 \cdot 10^{-5} \cdot P_{\text{и}} \cdot (\text{ПМПП}), \quad (18.215)$$

где $P_{\text{и}}$ – удельный расход известняка, кг/т чугуна;

(ПМПП) – потери массы при прокаливании известняка, %.

Обе величины являются входными для модели. Таким образом, все составляющие для расчета $Q_{\text{опт}}$ известны. Для нахождения значения индекса теплового состояния низа доменной печи должна быть рассчитана величина $Q_{\text{р}}$. Аналитическое выражение для определения фактических затрат теплоты в нижней зоне печи целесообразно для расчета представить в виде зависимости [18.135]:

$$Q_{\text{р}} = q_{\text{г}} / P_{\text{п}} + 4,184 \cdot Q_{\text{ш}} - 31750 \cdot \text{Fe}_0 \cdot r_{\text{д}} - 24600, \quad (18.216)$$

где $P_{\text{п}}$ – производительность печи; т чугуна/мин;

$Q_{\text{ш}}$ – приход тепла в нижнюю зону с потоком шихтовых материалов, кДж/т чугуна;

$r_{\text{д}}$ – степень прямого восстановления железа, доли ед.;

Fe_0 – содержание железа в чугуне за вычетом металлодобавок, %;

$q_{\text{г}}$ – суммарная мощность теплового потока, поступающего в нижнюю зону печи (без учета влияния физического тепла шихтовых материалов), кДж/мин;

24600 – коэффициент, учитывающий потери тепла с газами, которые образуются при восстановлении кремния, марганца, фосфора и других элементов, кДж/т чугуна;

Здесь Fe_0 является входным параметром для модели, а r_d и $Q_{ш}$ – выходными. В исходных данных модели задается суточная производительность $P_{сут}$, следовательно минутная производительность P_p :

$$P_p = P_{сут}/1440. \quad (18.217)$$

Для расчета Q_p по выражению (18.216) необходимо найти только суммарную мощность теплового потока q_r . Согласно [18.135], эта величина может быть рассчитана как:

$$q_r = (1,4 \cdot t_d - 1219) \cdot V_{N_2} + (1,5 \cdot t_d + 7924) \cdot V_{O_2} + [2,11 \cdot t_d - 9312 \cdot (1 + 0,158 \cdot \eta_{H_2})] \cdot V_{H_2O} - 6912 \cdot (1 + 0,411 \cdot \eta_{H_2}) \cdot V_{пг}, \quad (18.218)$$

где t_d – температура дутья, °C;

η_{H_2} – степень использования водорода, доли ед.;

$V_{ш}$ – расход природного газа, м³/мин.;

V_{N_2} , V_{O_2} и V_{H_2O} – рассчитываемые расходы азота, кислорода и паров воды, поступающих в печь с дутьем, м³/мин;

t_d и η_{H_2} являются входными для модели, поэтому их значения известны при расчете индекса тепловой зоны нижней части печи.

В исходных данных задается удельный расход природного газа на тонну чугуна $V_{пг}^{уд}$, с учетом известной минутной производительности может быть найдена величина $V_{пг}$:

$$V_{пг} = V_{пг}^{уд} \cdot P_p. \quad (18.219)$$

Оставшиеся величины V_{N_2} , V_{O_2} и V_{H_2O} могут быть рассчитаны в соответствии с [18.135]. Расход паров воды определяется как:

$$V_{H_2O} = 0,001244 \cdot V_d \cdot f_d, \quad (18.220)$$

где V_d – расход дутья, м³/мин;

f_d – влажность дутья, г/м³.

Последняя величина присутствует в исходных данных для модели. Рассчитываемый в модели расход дутья $V_d^{уд}$ приводится к тонне чугуна, следовательно:

$$V_d = V_{пг}^{уд} \cdot P_p. \quad (18.221)$$

Расход кислорода, поступающего в печь с дутьем, рассчитывается по формуле:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot \omega_d \cdot (V_d - V_{H_2O}), \quad (18.222)$$

где ω_d – содержание кислорода в дутье, %. Эта величина есть в исходных данных модели.

Дутье принимается состоящим из азота, кислорода и паров воды, поэтому расход азота находится из выражения:

$$V_{N_2} = V_d - V_{O_2} - V_{H_2O}, \quad (18.223)$$

где величины V_{H_2O} и V_{O_2} определяются по формулам (18.220) и (18.222).

Алгоритм расчета значения индекса теплового состояния нижней зоны доменной печи с использованием величин балансовой модели включает в себя нахождение следующих величин:

1) расхода водяного пара V_{H_2O} , кислорода V_{O_2} , азота V_{N_2} , поступающих с дутьем, по формулам (18.220), (18.222), (18.223);

2) суммарной мощности теплового потока, поступающего в нижнюю зону печи q_r , по выражению (18.218);

3) фактических затрат теплоты в нижней зоне печи Q_p в соответствии с (18.216);

4) оптимальных затраты тепла, требующихся для выплавки 1 т чугуна заданного состава при существующих условиях работы печи $Q_{опт}$, по формуле (18.214);

5) индекса теплового состояния нижней зоны печи i_n по выражению (18.117).

Таким образом, предложенная методика формирования набора параметров и переменных модели многомерного технологического объекта, основанная на методологии системного анализа позволяет структурировать это множество и обосновать его компоненты в отличие от общепринятого подхода (на основе здравого смысла и опыта специалиста). Сформированный перечень величин применительно к задаче управления доменным процессом целесообразно использовать для построения модели доменного процесса или при выборе наиболее соответствующей из существующих моделей.

Оценка балансовой модели доменной печи, разработанной в Институте металлургии УрО РАН, с точки зрения полноты набора используемых в ней параметров и переменных на основе предложенной методики позволила сделать вывод об актуальности внесения в

модель алгоритмов для определения индексов теплового состояния печи, а также о возможности ее использования в этом случае в качестве основы для системы поддержки принятия решений.

Разработанные алгоритмы расчетов индексов теплового состояния доменной печи позволили использовать имеющиеся входные данные и результаты вычислений по выбранной балансовой модели доменного процесса для их определения. Введение этих алгоритмов в виде модуля в программу, реализующую балансовую модель, позволило проводить компьютерный расчет значений индексов теплового состояния печи совместно с другими переменными и расширить функциональные возможности модели путем более полной оценки состояния тепловых процессов, что позволяет достигать большей стабильности хода печи при управлении.

Алгоритмическое обеспечение процедуры формирования значений управляющих воздействий

В соответствии с представлениями для экспертных систем такого сложного объекта как доменная печь в советчике (СППР) должен присутствовать базовый вариант, включающий входные и выходные переменные печи, принятые в качестве нормы в данный момент для данного производства. Соответственно, поиск решений необходим, когда по какой-то причине базовый вариант поддерживать невозможно или его нужно изменить.

Для нахождения новых значений управляющих величин реализована процедура в виде этапов, конкретизирующая описанные ранее представления. Данная реализация выполнена А.В. Сучковым под руководством автора [18.37; 18.179].

Этап 1. В качестве математической модели печи было принято решение использовать существующую балансовую модель, разработанную в Институте металлургии УрО РАН и основанную на зональных тепловых балансах. Данная математическая модель была усовершенствована, в нее добавлена возможность расчета индексов теплового состояния верха и низа печи.

Этап 2. При оценке эффективности доменного производства могут рассматриваться несколько критериев. В качестве показателей эффективности приняты удельный расход кокса, производительность печи и удельный выход шлака. Выбор удельного расхода кокса

связан с тем, что снижение затрат в доменном производстве может быть осуществлено, в первую очередь, именно за счет минимизации этого показателя (на долю кокса приходится около 40 % затрат производства, около 50 % приходится на железорудные материалы, но снижение количества или качества последних неприемлемо). От производительности доменной печи зависит объем получаемой прибыли, в частности сроки окупаемости капитальных вложений в доменную печь. Количество шлака характеризует качество протекания процессов в самой печи (в том числе тепловое состояние), качество железорудного сырья, а кроме того, затраты на его утилизацию или переработку. Шлак является отходом доменного производства и его количество должно быть минимизировано.

Рассмотрим обобщенные зависимости переменных процесса от управляющих величин. Ниже (см. табл. 18.16) показано влияние управляющих величин (расположенных в строках) на основные показатели процесса (расположенные в столбцах). В таблице приняты следующие сокращения:

- Существ. – существенная зависимость;
- Средн. – средняя зависимость;
- Незнач. – незначительная зависимость;
- Отсутст. – зависимость отсутствует.

При построении таблицы принималось во внимание, что если при изменении значения входной величины на 1/10 от допустимого диапазона отклонение выходного составляет более 1,5 %, зависимость считается существенной, от 0,5 % до 1,5 % – средней, менее 0,5 % – незначительной, около 0 % – отсутствующей. В случае отсутствия фактических данных использовалась экспертная информация.

Из табл. 18.16 следует, что задание сразу трех критериев не создает неразрешимых противоречий. Например, при повышении содержания железа в шихте производительность растет, расход кокса и выход шлака уменьшаются, т. е. улучшаются значения всех параметров эффективности, хотя и с различной интенсивностью. Таким образом, возможно использовать комплексный (векторный) показатель эффективности, включающий в себя все три параметра. Отметим, что между этими параметрами непосредственная связь отсутствует, что не позволяет вычислять значение одного параметра через другие.

Таблица 18.16

**Зависимости между управляющими величинами
и показателями процесса**

Управляющие величины	Показатели процесса						
	Удельный расход кокса	Производитель	Кремний в чугуне	Температура фурменного очага	Индекс верха	Индекс низа	Выход шлака
Содержание железа в шихте	Средн. (-)	Существ. (+)	Отсутст.	Отсутст.	Незнач. (-)	Незнач. (-)	Существ. (-)
Объем природного газа	Существ. (-)	Отсутст.	Средн. (-)	Существ. (-)	Средн. (+)	Средн. (-)	Средн. (-)
Количество угольной пыли	Существ. (-)	Отсутст.	Незнач. (-)	Средн. (-)	Незнач. (+)	Средн. (+)	Незнач. (+)
Температура дутья	Существ. (-)	Существ. (+)	Существ. (+)	Существ. (+)	Незнач. (+)	Средн. (+)	Отсутст.
Влага дутья	Незнач. (+)	Незнач. (-)	Существ. (-)	Средн. (-)	Средн. (-)	Средн. (-)	Отсутст.
Содержание кислорода в дутье	Незнач. (+)	Существ. (+)	Средн. (+)	Существ. (+)	Средн. (-)	Средн. (+)	Отсутст.
Основность шлака	Незнач. (+)	Отсутст.	Средн. (-)	Отсутст.	Отсутст.	Отсутст.	Средн. (+)

В качестве векторного критерия было предложено использовать аддитивный критерий вида [18.178]:

$$F = G_K^H \cdot V_K + P^H \cdot V_{II} + U_{III}^H \cdot V_{III}, \quad (18.224)$$

где G_K^H , P^H , U_{III}^H – нормализованные безразмерные значения расхода кокса, производительности печи и выхода шлака соответственно;

$V_k, V_n, V_{ш}$ – веса, отражающие предпочтительность данных критериев в конкретной ситуации, причем $0 \leq V_i \leq 1, \sum_{i=1}^3 V_i = 1$. При этом $0 \leq F \leq 1$.

Формула (18.224) достаточно просто преобразуется в двух- и однокритериальную задачу путем задания соответствующих весов параметров.

Величины параметров X_i^H определяются по выражению

$$X_i^H = \frac{X_i^{\max} - X_i}{X_i^{\max} - X_i^{\min}}, \quad (18.225)$$

в случае минимизации критерия (удельный расход кокса и выход шлака) и

$$X_i^H = \frac{X_i - X_i^{\min}}{X_i^{\max} - X_i^{\min}}, \quad (18.226)$$

в случае его максимизации (производительность печи).

Максимальное X_i^{\max} и минимальное X_i^{\min} возможные значения параметров определяются из условий работы печи на основе опыта персонала, результатов моделирования, статистики.

С учетом комплексного целевого критерия производится поиск субоптимальных решений, при этом в качестве допустимой величины отклонения найденного значения от оптимального принимается 1–2 % (конкретное значение задается операторами).

Этап 3. Ограничениями при выборе управляющих воздействий являются температура фурменного очага (характеризующая, в частности, интенсивность горения кокса), содержание кремния в чугуна (данная величина определяет степень вязкости и последующей ломкости чугуна, влияет на расход топлива). Производительность печи, расход кокса и величина выхода шлака также могут быть заданы в качестве выходных показателей с заданными ограничениями, если они не рассматриваются в качестве критериев оптимальности процесса. Кроме того, ограничениями могут являться индексы теплового состояния верха и низа доменной печи, причем в этом случае из числа ограничений исключается использование содержания кремния и производительности печи из-за их взаимозависимостей с индексами. Интервалы значений могут быть заданы для всех пере-

численных величин или только для некоторых из них, если решаемая задача это допускает. Границы этих интервалов определяются из текущих производственных требований. Температура фурменного очага должна быть около 2000–2100 °С, содержание кремния в чугуна зависит от типа производимого чугуна, но обычно от 0,3 % до 1 %, производительность (т чугуна/сутки) зависит от размеров печи, приблизительно ее можно оценить по соотношению:

$$P = V/\text{КИПО}, \quad (18.227)$$

где V – полезный объем печи, м³;

КИПО – коэффициент использования полезного объема, на современных печах он равен приблизительно 0,4–0,6 м³·сут/т.

Удельный расход кокса может составлять от 300 кг/т чугуна до 500 кг/т чугуна для современных печей, работающих с подачей в горн углеродсодержащих веществ при обогащении дутья кислородом.

Как отмечено выше, оптимальное значение индекса теплового состояния верха печи может принимать значения от 0,55 до 0,8, индекса низа – около 1.

Этап 4. На данном этапе необходимо определить управляющие переменные. Выбраны величины, позволяющие в наибольшей степени воздействовать на ход доменной печи и показатели плавки: расход природного газа, расход пылеугольного топлива, параметры дутья (температура, влажность, доля кислорода), основность шлака, содержание железа в рудной части шихты. Эти переменные используются практически на всех функционирующих доменных печах при решении задач по управлению (за исключением расхода угольной пыли, которая также начинает применяться в России и соответствующая технология достаточно распространена за рубежом). При этом каждая управляющая переменная влияет на несколько выходных и внутренних переменных доменного процесса (см. табл. 18.16). Необходимо также отметить, что рассмотрение основности шлака в качестве управляющей переменной величины является допустимым и достаточно распространенным, так как она может относительно легко регулироваться при помощи изменения параметров шихты (например, с помощью добавления известняка) и позволяет влиять на газопроницаемость горна, степень восстановления элементов в печи и состав чугуна.

Изменение перечисленных управляющих величин позволяет эффективно осуществлять регулирование протекания процесса на существующих доменных печах. Можно выделить некоторые общие ограничения на значения этих переменных, существующие в настоящее время в доменном производстве [18.171; 18.172].

Минимальная температура дутья может составлять около 800–900 °С, максимальная около 1200–1300 °С. Повышение температуры дутья способствует интенсификации процесса, поэтому ее стремятся поднимать и далее, но это требует совершенствования оборудования доменного цеха.

Влажность дутья может изменяться от 3 г/м³ до 40 г/м³. Нижняя граница, как правило, соответствует минимальной естественной влажности воздуха (зависит от климатических условий), более высокие значения используются главным образом для регулирования и стабилизации температуры горна (которая снижается при повышении влажности). При этом важен тот факт, что водород, получающийся в результате разложения воды, является эффективным восстановителем для оксидов железа.

Содержание кислорода в дутье может изменяться от 21 % (в случае отсутствия обогащения дутья кислородом) до 30 % и выше. Дополнительный кислород способствует повышению производительности печи. При этом ограничивающими факторами являются снижение температуры верха печи и перегрев горна, а также снижение перепада давлений по высоте печи.

Расход природного газа, который является топливом и позволяет снизить потребность в коксе, может меняться от 0 до ~ 130 м³/т чугуна. Большое количество подаваемого природного газа влечет за собой охлаждение горна и увеличение перепада давлений по высоте печи. Совместное использование кислорода и природного газа, таким образом, позволяет скомпенсировать негативные эффекты от их применения.

Все шире используется пылеугольное топливо, в том числе для замены природного газа, что экономически эффективно; его расход может составлять от 0 до 250 кг/т чугуна (использование угольной пыли рассмотрено в п. 18.5.9).

Отметим, что на отдельных предприятиях указанные верхние пределы перечисленных величин могут быть ниже из-за ограничений, обусловленных возможностями оборудования.

Содержание железа в шихте может изменяться от 50 % до 65 %; при слишком низком содержании железа доменная плавка становится неэффективной (большой расход кокса и выход шлака), обогащение же шихты выше указанного предела экономически невыгодно.

Основность шлаков находится в диапазоне 0,8–1,3. Чрезмерно низкие значения не позволяют эффективно удалять серу из чугуна, а высокие способствуют слишком резкому загустеванию шлака, что может нарушить ровный ход печи.

Необходимо отметить, что варьирование и формирование рекомендаций для всех выбранных управляющих величин одновременно нецелесообразно, или даже невозможно (как правило, технологии подачи угольной пыли и природного газа исключают друг друга), поэтому при поиске решений для части из них задается точечная оценка. Кроме ограничений, существующих на производстве, вводятся пределы отклонений управляющих переменных от базовых значений (при которых модель была адаптирована) для сохранения адекватности модели объекту. Численные значения этих пределов были получены авторами модели при ее практическом применении. Для параметров дутья величины допустимых отклонений следующие: содержание кислорода в дутье может меняться на 1,5 % в большую и меньшую сторону от базового, температура дутья на 50 °С, влага в дутье на 5 % в ту или другую сторону. Расход природного газа и угольной пыли может отклоняться от базовых значений на 10 м³/т чугуна и 10 кг/т чугуна соответственно. Для содержания железа в шихте величина изменения должна быть в пределах $\pm 3 \%$, для основности шлака $\pm 0,15$ по отношению к базовому значению.

Этап 5. После формирования набора управляющих воздействий необходимо определить для них величины шагов дискретизации. Эти шаги выбираются настолько малыми, что дальнейшее уменьшение не имеет практического смысла (например, 0,05–0,1 % для изменения содержания кислорода в дутье, 5–10 °С для температуры дутья и т. д.). При этом изменение управляющего воздействия на один шаг приводит к незначительному изменению значений контролируемых выходных переменных печи и критерия оптимальности (до 0,2 %). Необходимо учитывать, что в условиях конкретной доменной печи значения шагов могут быть ограничены техническими возможностями используемого оборудования. Величины шагов могут быть изменены операторами в процессе работы с СППР.

Этап 6. На этом этапе происходит поиск управляющих воздействий (возможных и субоптимальных решений) в соответствии с заданными условиями. Для определения наборов управляющих воздействий используется метод полного перебора. При этом количество расчетов (итераций) по модели составит:

$$N = \prod_{i=1...n} P_i, \quad (18.228)$$

где P_i – число шагов, на которые разбивается диапазон i -й входной величины;

n – число управляющих величин.

Число шагов P_i для i -й входной величины рассчитывается так:

$$P_i = \text{Int}((X_{\text{икон}} - X_{\text{нач}})/S_i) + 1, \quad (18.229)$$

где Int – целая часть дробного числа (операция округления дробного числа в меньшую сторону);

$X_{\text{нач}}$ – нижняя граница диапазона;

$X_{\text{икон}}$ – верхняя граница диапазона;

S_i – величина шага.

Так как просчитываются все возможные варианты комбинаций входных переменных с заданным шагом, количество расчетов по модели получается большим. Например, если выбранных для формирования рекомендаций входных величин 4 (это наиболее часто используемые при управлении переменные, связанные с дутьем), а от минимально возможного до максимального значения каждой входной величины 20 шагов, то количество итераций составит $20^4 = 160\,000$.

После осуществления полного перебора из найденного множества отбираются субоптимальные решения, для которых отклонение комплексного критерия эффективности от оптимального по умолчанию принимается равным 1 % (может быть изменено пользователем).

Этап 7. Здесь происходит выделение итоговых результатов из найденного на предыдущем этапе множества субоптимальных решений. Для этого предложен следующий эвристический алгоритм.

Шаг 1. Разбиение всего множества субоптимальных решений на классы.

Рассмотрим математическую постановку задачи разбиения полученного множества субоптимальных решений A , мощность кото-

рого равна n , на заданное число классов p . В качестве меры близости между точками i и j пространства субоптимальных решений предложено ввести величину

$$C_{ij} = \sum_{l=1}^m |b_{li} - b_{lj}|, \quad (18.230)$$

где b_{li} , b_{lj} – число шагов по координате l от ее начала, полученное при формировании соответствующей точки;

m – число управляемых в данной ситуации переменных (координат пространства);

C_{ij} находится в интервале $[0, \infty]$.

Введены в рассмотрение величины X_{ik} , X_{jk} , которые равны 1, если соответствующая точка i принадлежит k -му классу, и 0 – в противном случае.

Тогда математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Найти минимум целевой функции Z :

$$Z = \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ik} C_{ij} X_{jk}, \quad (18.231)$$

при ограничениях

$$\sum_{k=1}^p X_{ik} = 1, \quad (18.232)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ik} \geq 1, \quad (18.233)$$

$$\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n X_{ik} = n. \quad (18.234)$$

Ограничение (18.232) характеризует тот факт, что каждый объект принадлежит только одному классу, ограничение (18.233) свидетельствует о том, что каждый класс состоит хотя бы из одного объекта, а ограничение (18.234) требует, чтобы все множество субоптимальных решений было распределено по классам.

Задача (18.231)–(18.234) является квадратичной задачей о назначениях и для ее решения можно, например, использовать метод ветвей и границ. Однако следует отметить, что точные методы решения комбинаторных задач эффективны в случае их небольшой размер-

ности. Как уже отмечалось, число субоптимальных решений может достигать нескольких тысяч, поэтому целесообразно для целей их классификации использовать эвристический подход.

Идея предлагаемого алгоритма заключалась в следующем.

Считается, что если выполняется условие (18.235) для всех измерений (координат) l :

$$|b_{li} - blj| \leq 1, \quad (18.235)$$

то точки I и j принадлежат одному классу.

Вначале из множества A выбирается произвольная точка и относится к классу A_1 , затем проверяют все остальные на выполнение условия (18.235) и точки, для которых оно выполняется, помечаются принадлежащими к этому же классу. Для каждой из новых точек класса проводится процедура проверки принадлежности к классу A_1 непомеченных ранее точек и при выполнении условия выбранные точки также включаются в класс A_1 . Проверка продолжается далее и на каком-то шаге не будет найдено новых точек, принадлежащих данному классу. Таким образом класс A_1 сформирован.

Для формирования класса A_2 из оставшихся выбирают произвольную точку, помечают ее принадлежащей к этому классу и аналогичным образом формируют класс, перебирая только те точки, которые не входят в уже сформированный ранее класс. Подобным образом получают остальные классы. Очевидно, что между точками, принадлежащими разным классам, всегда имеется расстояние более одного шага хотя бы по одному измерению.

Шаг 2. Разбиение каждого полученного на предыдущем шаге класса на подклассы.

Полученные классы делятся на подклассы исходя из интервала точности для каждого управляющего воздействия. Интервал точности – это фиксированная величина, заданная для каждой управляющей переменной, изменение которого на этот интервал приводит к заметному (более 1 %) отклонению значений выходных величин. Как правило, это минимальное изменение, которое уже требует компенсации за счет других управляющих величин. В заданном для перебора диапазоне управляющей величины находится до 2–5 интервалов точности, а сам этот интервал, в свою очередь, включает 5–10 шагов изменения управляющей величины, которые использовались

при выборе возможных решений. Например, для расхода природного газа принятая величина интервала точности равна $10 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, для кислорода в дутье – 1 %.

Для разбиения класса k оценивается его протяженность в шагах по каждому управляющему воздействию. По измерению с наибольшей протяженностью L_k^{\max} класс k делится на равные части. Их количество S находится по выражению (18.236):

$$S = \text{Int} (L_k^{\max} / t_l) + 1, \quad (18.236)$$

где Int – целая часть дробного числа (операция округления дробного числа в меньшую сторону);

t_l – интервал точности по координате l , для которой достигается L_k^{\max} .

Каждый из полученных подклассов аналогичным образом оценивается по другим управляющим воздействиям и разбивается по измерению с наибольшей протяженностью. Таким образом, подклассы делятся до тех пор, пока размер каждого из них не станет равным или меньшим соответствующего интервала точности по каждому измерению.

Данная процедура пояснена на конкретном примере для двух управляющих величин (см. рис. 18.57). Имеется некоторое количество точек, принадлежащее одному классу, т. е. каждая точка имеет соседнюю, расстояние до которой не более одного шага по обоим измерениям. Примем интервал точности равным 3 шагам для обоих измерений. Протяженность класса по оси первого управляющего воздействия (горизонтالي) составляет 11 шагов, по вертикали – 7, таким образом, класс должен разбиваться по первому измерению. Количество интервалов, на которые класс должен быть разбит $11/3 = 3,6666$. Так как количество интервалов должно быть целым, необходимо дробное число округлить в большую сторону, получаем 4 интервала. Класс делили по горизонтали на 4 участка равной ширины ($11/4 = 2,75$ шага); данное разделение отражено на рис. 18.57. Далее необходимо определить количество интервалов и линии разбиения по вертикали для каждого полученного участка. Высота первого (левого) участка 2 шага, что соответствует одному интервалу, второго и третьего – по 6 шагов, поэтому их нужно разбить на $6/3 = 2$ интервала. Четвертый участок имеет 1 шаг в высоту и 1 вертикаль-

ный интервал. Точки, лежащие на линии, присоединяются к подклассу с меньшими значениями соответствующего управляющего воздействия. Класс, разделенный на полученные таким образом подклассы, показан на рис. 18.58.

Шаг 3. Нахождение результирующей точки для каждого подкласса.

Для каждого подкласса q находится средняя точка. Значения ее координат b_{lc}^q определяются по выражению (18.237):

$$b_{lc}^q = \frac{\sum_{i=1}^{n_q} b_{li}}{n_q}, \quad (18.237)$$

где b_{li} – значение координаты l для точки i , относящейся к подклассу q ;

n_q – число элементов в q -м подклассе.

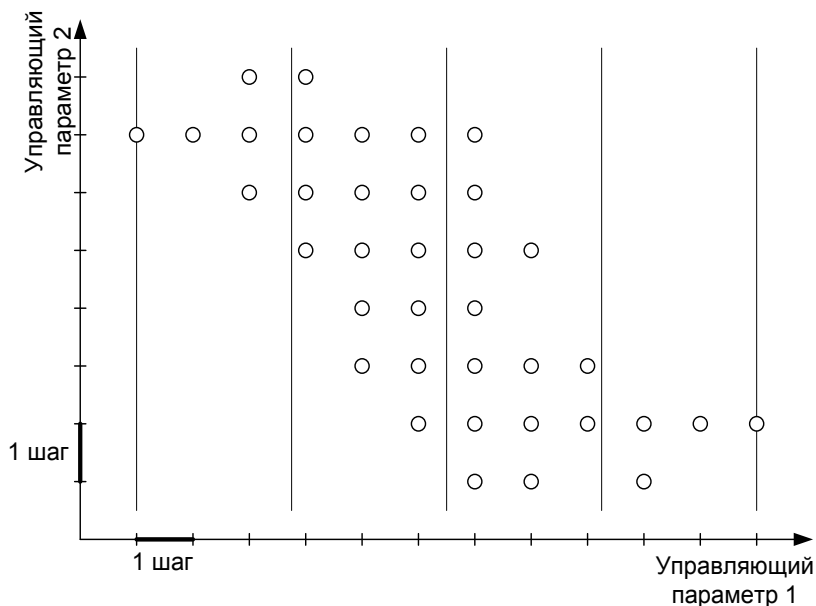


Рис. 18.57. Разбиение классов для формирования подклассов

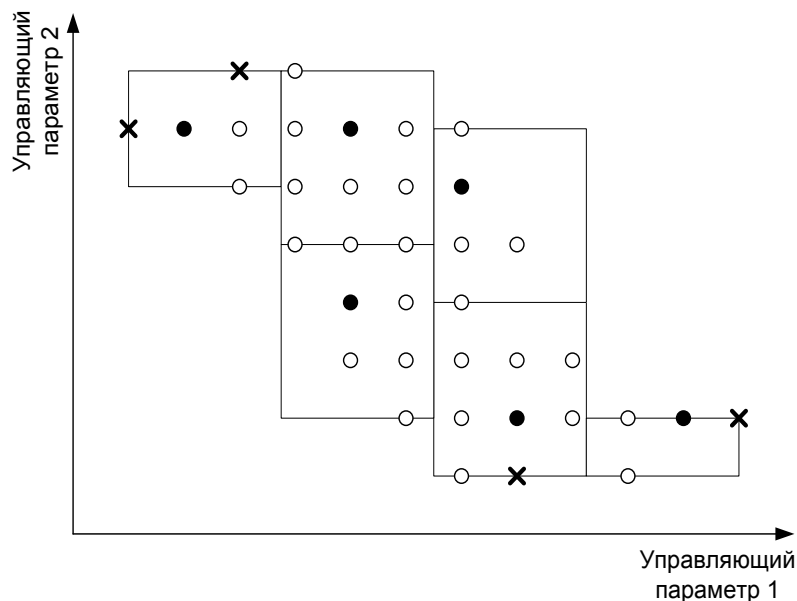


Рис. 18.58. Получение подклассов

Полученные таким образом значения координат не берутся в качестве рекомендуемых, поскольку в общем случае эта точка может не удовлетворять заданному выходному условию. Это характерно для областей, имеющих «изогнутую» форму. На рис. 18.59 показан пример области в двумерном пространстве (обведена контуром), значения управляющих величин из которой удовлетворяют заданным ограничениям на выходные. Средняя точка (перечеркнута) лежит за пределами данной области. К тому же координаты полученной средней точки могут иметь вид конечной или бесконечной десятичной дроби, неприемлемой для реализации при управлении.

В качестве результирующей выбирается точка r , уже входящая в число решений, ближайшая к расчетной средней. Для этой точки характерно минимальное значение расстояния U_r от каждой точки q -го подкласса, определяемое выражением (18.238):

$$U_r = \min_{r \in A_q} \sum_{l=1}^m |b_{lr} - b_{lc}|, \quad (18.238)$$

где b_{lc} — значение координаты l (в шагах) для средней точки с подкласса q ,

Aq – множество точек, составляющих подкласс q .

На рис. 18.58, 18.59 точки, ближайшие к средней точке подкласса, показаны в виде черных точек. В данном примере число точек невелико и всего два управляющих воздействия, на практике число измерений может быть до 5, исходное число точек – до нескольких тысяч, количество итоговых решений – до 20–30.

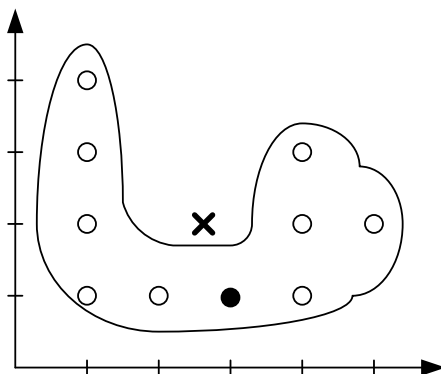


Рис. 18.59. Пример области и средней точки, лежащей за ее пределами

Шаг 4. Добавление к результирующим точкам, полученным на предыдущем шаге, крайних точек множества субоптимальных решений по каждому измерению.

Часто в процессе управления предпочтительными являются крайние значения управляющих переменных, обеспечивающие нужные результаты. Поэтому итоговый массив дополняется точками, имеющими минимальное и максимальное значение каждого воздействия на найденном множестве субоптимальных решений. Таких точек в два раза больше, чем управляющих величин. Если имеются разные точки с одинаковым крайним значением по одному из измерений, из них находится средняя точка (с учетом других переменных), а затем ближайшая к средней из числа субоптимальных решений, аналогично предыдущему шагу (выражения (18.237), (18.238)). Эта точка добавляется в набор итоговых результатов. Если минимальное или максимальное значение по данному измерению уже присутствует в одном из результатов итогового множества, соответствующие точки не добавляются.

В рассмотренном примере крайних точек 4, на рис. 18.58 они перечеркнуты.

Этап 8. В случае, если при заданных оператором условиях решения не найдены, может быть задействована процедура, вырабатывающая рекомендации по изменению заданных пользователем ограничений для выходных переменных и изменению входных величин, заданных точечной оценкой.

Производится расширение диапазонов выходных и внутренних переменных процесса до границ, обусловленных объективными причинами (технологический режим, качество продукции, возможности модели), затем производится повторное сканирование. При каждом найденном решении проверяется, за счет расширения диапазона какой выходной величины оно получено (причем фиксируется, в большую или меньшую сторону). После проверки наличия решений при расширенных диапазонах выходных и внутренних переменных соответствующие параметры устанавливаются на исходные значения.

Затем происходит поиск решений при расширении границ управляющих переменных до допустимых с технологической точки зрения точки зрения при сохранении адекватности модели. Сканирование производится столько раз, сколько присутствует входных переменных с расширенными интервалами.

Аналогичным образом проверяется возможность получения решения при изменении входных величин, заданных пользователем однозначно. В этом случае для поиска также задается диапазон допустимого изменения такой величины. Исключением являются конкретные значения управляющих величин, которые не расширяются до диапазонов. Это нулевая подача угольной пыли, природного газа, 21 % содержания кислорода в дутье.

На данном этапе шаг сканирования увеличивается в два раза, так как это значительно уменьшает число итераций. Рекомендации на этом шаге вырабатываются на качественном уровне, поэтому требования к точности полученных количественных результатов отсутствуют. Если в результате проверки найдены возможные наборы управляющих величин, направление изменения требуемого значения входной, внутренней или выходной переменной выдается (после окончания процедуры) в качестве рекомендации пользователю.

Оценим количество итераций в случае отсутствия решений при заданных условиях.

При проверке наличия решений в случае расширения выходных диапазонов, согласно соотношению (18.228), используется $\prod_{i=1, n} \frac{P_i}{2}$ итераций.

При замене точечной оценки входной переменной диапазоном получаем увеличение количества управляющих величин, заданных интервалами, на 1, поэтому при увеличении переборов на единицу это выражение примет вид $\prod_{i=1, n} \frac{P_i}{2} \cdot \frac{P_j}{2}$, где $P_j/2$ – количество шагов для вновь добавленного интервала. При поочередной проверке изменения всех входных величин, заданных числом, получаем

$\sum_{j=1, m} \left(\prod_{i=1, n} \frac{P_i}{2} \cdot \frac{P_j}{2} \right)$ итераций, где m – количество входных переменных, для которых точечная оценка заменена интервалом.

Расширение существующего интервала изменения входной величины эквивалентно удалению старого интервала и добавлению нового. Соответствующее количество итераций составит

$\sum_{j=1, k} \left(\prod_{i=1, n-1} \frac{P_i}{2} \cdot \frac{P_j}{2} \right)$, где k – число измененных интервалов.

Итоговое количество итераций в случае поиска рекомендаций при отсутствии решений составит:

$$N = \prod_{i=1, n} \frac{P_i}{2} + \sum_{j=1, m} \left(\prod_{i=1, n} \frac{P_i}{2} \cdot \frac{P_j}{2} \right) + \sum_{j=1, k} \left(\prod_{i=1, n-1} \frac{P_i}{2} \cdot \frac{P_j}{2} \right).$$

Этап 9. На данном этапе происходит вывод результатов. Они представлены в виде таблицы, где строкам соответствуют рекомендуемые решения, а столбцам входные (в левой части) и выходные (в правой части) переменные. Вывод производится, например, при помощи MS Excel. При отсутствии решений выводятся рекомендации, формирование которых рассмотрено на предыдущем этапе.

Если пользователю необходимо изменить какие-либо начальные условия, он может это сделать после вывода результатов. Тогда после запуска процедура выработки рекомендаций выполнится заново, в результате будут получены новые значения управляющих воздействий.

Программный комплекс «Советчик мастера доменной печи»

В разработанной программе реализуются три режима работы. Основной режим – это подбор управляющих величин, обеспечивающих необходимое качество процесса (режим советчика). Общий алгоритм реализации этого режима приведен на рис. 18.60. Для поиска значений управляющих величин необходимо задать их набор, интервалы изменения либо точечные значения всех переменных модели, весовые коэффициенты составляющих векторного критерия. Пример задания значений переменных с помощью разработанного программного продукта приведен на рис. 18.61. В настройках программы (см. рис. 18.56) можно изменить значения шага дискретизации для входных величин и допустимых отклонений для выходных.

Второй режим – построение графиков зависимостей. В нем задается одна входная величина и интервал ее изменения. Для каждого дискретного значения этой входной величины (в сочетании с другими входными величинами, которые неизменны и имеют базовую величину) по модели рассчитываются значения заданного набора выходных, на основании найденных зависимостей программой строятся и выводятся графики.

Третий режим – режим однократного расчета. Он реализует работу модели на основе базовых данных. Режим не требует настроек описываемой программы. В отличие от других режимов, в качестве результатов расчета здесь выводится информация о тепловом балансе для верхней и нижней зоны печи, степени прямого восстановления, составе колошникового газа, количестве шлака. Этот режим используется, в частности, для настройки модели печи.

Программа, обеспечивающая работу СППР, написана на языке Delphi для платформы Win32.

Готовая к применению программа представляет из себя один исполняемый файл размером до 1 Мб, также для работы требуется база данных формата Excel размером до 100 Кб. Описываемая программа реализации СППР представлена в статье [18.179].

Рассмотрим более подробно реализацию алгоритма, приведенного на рис. 18.60, осуществляющего формирование наборов управляющих переменных для операторов.

Каждый функциональный блок алгоритма выполняется соответствующей программной процедурой. В процессе реализации блока 2 алгоритма пользователем задаются входные, выходные и внутренние переменные. Интервалы изменения и точечные оценки входных вели-

чин, а также требуемые значения выходных задаются при помощи интерфейса основного окна программы (см. рис. 18.61). Величины шагов для входных величин и допустимые отклонения для выходных, вводятся через окно настроек (см. рис. 18.56), на котором присутствуют сразу все входные и выходные величины; вид данного окна не зависит от заданных в основном окне условий. Также на данном этапе происходит программная обработка заданных условий, проверяется наличие ошибок (например, когда начальное значение диапазона больше конечного).

Формируются несколько массивов данных, используемых затем в процессе расчетов:

- двумерный массив выходных и внутренних переменных печи, содержащий заданные пользователем требуемые значения и допустимые отклонения;
- двумерный массив управляющих воздействий, содержащий начало и конец диапазона изменения, величину шага дискретизации каждого воздействия;
- массив входных величин, заданных числом;
- массив данных, считываемых из файла настройки (формата MS Excel).

После формирования исходных данных происходит запуск процедуры поиска результатов (блок 3 алгоритма), в которую передаются сформированные массивы.

В соответствии с рассмотренной процедурой производится поиск наборов возможных результатов методом перебора и выбор субоптимальных решений. Формируются два двумерных массива, в первом из которых содержится набор значений заданного множества управляющих переменных, во втором – соответствующие им значения выходных из заданного множества.

В результате работы процедуры классификации точек, являющихся субоптимальными решениями (см. блок 5 рис. 18.60), каждая точка получает числовой идентификатор принадлежности определенному классу; эта информация вносится в массив субоптимальных решений. Аналогичным образом отмечается принадлежность точки к подклассу (после выполнения процедуры, соответствующей блоку 6 на рис. 18.60). Формирование классов и подклассов рассмотрено ранее (этап 7, шаг 1 и 2).

Далее в соответствии с алгоритмом находятся итоговые точки, формируется набор рекомендуемых значений управляющих переменных, который затем предоставляется пользователю. Данный процесс рассмотрен ранее (этап 7, шаги 3–5).



Рис. 18.60. Алгоритм формирования рекомендаций в СППР

При отсутствии решений по запросу пользователя выполняется поиск рекомендаций по изменению входных и выходных величин (блок 10 алгоритма, см. рис. 18.60).

В процедуре, обеспечивающей вывод результата, осуществляется проверка наличия решений. Если итоговые результаты найдены, осуществляется вывод рекомендаций по регулированию в файл формата MS Excel. Множество решений выводится в виде сочетаний значений входных переменных и соответствующих им выходных, каждому решению соответствует своя строка. Если при заданных пользователем условиях решения отсутствуют и при этом найдены рекомендации по изменению входных и выходных величин, они выводятся при помощи стандартной процедуры вывода сообщения, каждая рекомендация выводится с новой строки.

В программе имеется возможность сохранения и восстановления настроек для того, чтобы при следующем запуске все исходные переменные были такими же, как при предшествующем закрытии программы.

При использовании СППР большое значение имеет время получения рекомендаций. Оценено число итераций в случае, если решения найдены и в случае, если не найдены и формируются рекомендации по изменению переменных.

Если диапазоны для всех входных величин не заданы, а выбраны только их точечные значения, будет всего один расчет. Наличие диапазонов создает необходимость многократных расчетов для оценки всех вариантов. Рассмотрим набор заданных величин, приведенный на рис. 18.61, где заданы диапазоны управляющих переменных и значения выходных и внутренних. Воспользовались формулами (18.228) и (18.239) для оценки количества итераций для исходных условий, приведенных на рисунках. Для первоначального поиска решений используется, согласно выражению (18.228), 140 000 итераций. При отсутствии решений происходит анализ вариантов при новых изменениях входных переменных и время вычислений увеличивается. При использовании выражения (18.239), получили количество расчетов по модели, равное 297 500. Таким образом, количество расчетов по модели печи в случае отсутствия решений превышает исходное в 2,125 раза.

Было замерено время расчета в первом и втором случае – при наличии решений время составило 11–14 с в зависимости от коли-

Советчик мастера доменной печи

Входные величины

Природный газ, м³/т чугуна

Базовое значение

95

Диапазон

Новое значение

85 - 105

Угольная пыль, кг/т чугуна

Базовое значение

0

Не меняется

Основность шлака CaO/SiO₂, ед

Базовое значение

1,04

Не меняется

Температура дутья, С

Базовое значение

1176

Диапазон

1150 - 1220

Кислород в дутье, %

Базовое значение

21,9

Диапазон

21 - 23

Влага в дутье, г/м³

Базовое значение

14

Не меняется

Железо в шихте, %

Базовое значение

57,4

Диапазон

55 - 60

Выходные величины с ограничениями

Расход кокса, кг/т чугуна

☐

Температура фурменного очага, С

☒

2000

Крепкий в чугуне, %

☒

0,3

0,3

Производительность, т/сутки

☐

3450

Выход шлака, кг/т чугуна

☐

Индекс верхней тепловой зоны

☐

Индекс нижней тепловой зоны

☐

Критерии оптим. и их весовые коэффициенты

Минимальный расход кокса

☒

0,6

Максимальная производительность

☒

0,4

Минимальный выход шлака

☐

Настроить

Начать

Режим: Подбор управляющих величин

Рис. 18.61. Основное окно программы

чества найденных решений, при отсутствии решений 24–30 с. Получили, что время вычислений прямо пропорционально количеству итераций расчетов по модели (которые осуществляются в блоке 2, рис. 18.60, а также в блоке 10 при отсутствии решений), время же выполнения остальных действий (например, отбора итоговых решений из числа субоптимальных) несущественно. Поэтому время поиска рекомендаций t в программе может быть оценено по выражению:

$$t = t_1 \cdot N, \quad (18.239)$$

где t_1 – время однократного расчета по модели; N – число итераций.

Очевидно, что это время зависит от начальных условий и производительности компьютера.

При использовании формулы (18.239) была оценена зависимость времени расчетов от числа управляющих переменных и числа шагов, на которые разбивается интервал.

Так при числе шагов для каждой управляющей величины, равном 30, и числе управляющих переменных, равном 3, время вычислений составляло 2,4 с. При числе управляющих переменных, равных четырем, это время увеличивалось до 72 с. При числе шагов, равных 10, это время снижалось до 0,1 и 0,9 соответственно.

Использовался компьютер с одноядерным процессором AMD Athlon 2500+, имеющим тактовую частоту 1833 МГц. С развитием микропроцессорной техники, в том числе многоядерных процессоров, ростом скорости вычислений предложенная процедура формирования рекомендаций в системе поддержки принятия решений становится более актуальной, поскольку появляется возможность увеличить количество управляющих переменных, доступных для перебора, уменьшить шаг изменения входной величины (таким образом повысив точность), уменьшить время вычислений.

Результаты использования разработанного программного продукта

Детальное описание результатов приведено в монографии [18.37].

Как отмечалось, предложенный метод построения поддержки принятия решений реализован в виде программы «Советчик мастера доменной печи». Она написана на языке Delphi для платформы Win32. Интерфейс программы реализован при помощи четырех окон, в том

числе основного окна, где задаются значения и интервалы управляющих и выходных величин, и окна настроек, на которых редактируется ряд дополнительных параметров, например величина шагов дискредитации. Готовая к применению программа представляет из себя один исполняемый файл размером менее 1 Мб, также для работы требуется база данных формата Excel размером до 100 Кб.

Были получены результаты использования данной программы применительно к различным технологическим ситуациям для доменных печей, часть из которых представлены в табл. 18.17 и 18.18.

В табл. 18.17 приняты следующие обозначения: ДП № 1 – доменная печь объемом 225 м³ без обогащения дутья кислородом; ДП № 2 – доменная печь объемом 1719 м³; $V_{\text{пр}}$ – расход природного газа; O_2 – содержание кислорода в дутье; T_d – температура дутья; f – влажность дутья; Fe – содержание железа в рудных материалах; L – основность шлака; K – величина снижения расхода кокса; ΔP – повышение производительности; $T_{\text{фо}}$ – температура фурменного очага.

Программный продукт «Советчик мастера доменной печи» позволяет улучшить возможности оперативного управления процессом. Преимущества разработанной программы по сравнению с применявшимися экспертными системами в следующем:

- осуществляется выбор наилучшего решения в количественном виде с учетом различных вариантов сочетаний значений управляющих величин;
- уменьшается время и трудозатраты на проведение расчетов;
- достигается большая достоверность получаемых результатов, особенно в нестандартных ситуациях, по которым отсутствует статистика и недостаточно опыта у персонала;
- увеличивается точность результатов, обусловленная относительно малой величиной шага в процессе перебора возможных значений воздействий.

Сформируем выводы по проделанной работе.

1. Предложенная экспертная система позволяет на основе использования модифицированной балансовой модели доменной печи осуществлять за приемлемое время поиск рациональных (субоптимальных по отношению к предложенному векторному критерию эффективности) рекомендаций по ведению доменного процесса с учетом допустимых вариантов значений его входных и выходных переменных.

Таблица 18.17

Результаты расчетов с использованием разработанной СППР

Описание проблемы	Базовые условия	Заданные новые условия	Один из рекомендуемых результатов	Оценка результатов
ДП № 1, снижение содержания железа в рудных материалах на 2 %	$V_{\text{пр}} = 65 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,25$; $T_{\text{д}} = 916 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 12 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 59,2$	$V_{\text{пр}} = 55\text{--}75 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,1\text{--}1,3$; $T_{\text{д}} = 900\text{--}950 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 8\text{--}15 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 57,2$	$V_{\text{пр}} = 75 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,18$; $T_{\text{д}} = 945 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 9 \text{ г}/\text{м}^3$	При возможности соответствующего повышения $T_{\text{д}}$ и $V_{\text{пр}}$ достигается $\Delta K = 1,1 \%$
ДП № 1, опасность возникновения холодного кода	$V_{\text{пр}} = 70 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 13 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 59,2$	$V_{\text{пр}} = 60\text{--}80 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 900\text{--}950 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 8\text{--}15 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 57,2$	$V_{\text{пр}} = 61 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 950 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 8 \text{ г}/\text{м}^3$	Приведение значений индексов теплового состояния к требуемым, повышение $T_{\text{фо}}$ на $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta K = 1,4 \%$
ДП № 2, переход с выплавки перелдального чугуна на ванадий	$V_{\text{пр}} = 100 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,05$; $T_{\text{д}} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{O}_2 = 22 \%$; $f^{\text{д}} = 13 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 58,2$	$V_{\text{пр}} = 90\text{--}110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,25$; $T_{\text{д}} = 1100\text{--}1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{O}_2 = 21\text{--}22 \%$; $f^{\text{д}} = 8\text{--}15 \text{ г}/\text{м}^3$	$V_{\text{пр}} = 109 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 1105 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{O}_2 = 21,1 \%$; $f^{\text{д}} = 10,5 \text{ г}/\text{м}^3$	Удалось достичь необходимых показателей, в том числе снижения $T_{\text{фо}}$ на $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta K = 1,2 \%$;
ДП № 2, опасность возникновения горячего кода	$V_{\text{пр}} = 65 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $L = 1,25$; $T_{\text{д}} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\text{O}_2 = 23 \%$; $f^{\text{д}} = 10 \text{ г}/\text{м}^3$; $\text{Fe} = 58,2$	$V_{\text{пр}} = 90\text{--}110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 1140\text{--}1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 8\text{--}15 \text{ г}/\text{м}^3$	$V_{\text{пр}} = 110 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна; $T_{\text{д}} = 1145 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $f^{\text{д}} = 15 \text{ г}/\text{м}^3$	Приведение значений индексов теплового состояния к требуемым, снижение $T_{\text{фо}}$ на $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta K = 0,8 \%$

Таблица 18.18

Фрагмент таблицы зависимости удельного расхода кокса и производительности печи от значений управляющих переменных

Наименование фактора и величины его изменения	Расход кокса, %	Производительность, %
Изменение температуры дутья при атмосферном дутье, °С:		
от 801 до 900	- 4,2	+ 4,0
от 901 до 1000	- 3,9	+ 3,7
от 1001 до 1100	- 3,5	+ 3,2
Изменение температуры дутья при концентрации кислорода в дутье до 25 %, °С:		
от 1001 до 1100	- 3,0	+ 3,0
от 1101 до 1200	- 2,8	+ 2,8
Изменение температуры дутья при концентрации кислорода в дутье до 25 % - 35%, °С:		
от 1001 до 1100	- 2,5	+ 2,5
от 1101 до 1200	- 2,2	+ 2,2
Уменьшение влажности дутья на каждый 1 г/м ³ :		
При расходе дутья 1500–1600 м ³ /т	- 0,20	+ 0,10
При расходе дутья 1000–1100 м ³ /т	- 0,15	+ 0,07
Обогащение дутья кислородом на каждый 1 % при его содержании в дутье, %:		
до 25		
от 26 до 30	+ 0,20	+ 2,4
от 31 до 35	+ 0,30	+ 2,1
	+ 0,30	+ 1,8

2. Подход к выбору значений управляющих переменных величин доменного процесса с использованием векторного критерия оптимальности расширяет возможности управления доменной печью, позволяя учесть одновременно несколько требований к протеканию процесса и его результатам.

3. Предложенный в рамках процедуры поиска рекомендаций по выбору решений эвристический алгоритм классификации наборов значений управляющих воздействий на неизвестное заранее число

классов, а также формирования рекомендуемых сочетаний этих наборов позволяет за допустимое время решить проблему определения рекомендуемого набора значений управляющих воздействий и сократить время выбора решений при управлении.

4. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса «Советчик мастера доменной печи», который дает возможность формировать, с учетом заданных ограничений на переменные процесса и весовых коэффициентов составляющих критерия эффективности, более качественные решения и в более короткие сроки, чем применяемые на многих предприятиях методы.

5. Программа-советчик была использована в доменном цехе Чусовского металлургического завода для формирования рекомендаций по управлению доменной печью. Этот же программный комплекс был использован в качестве тренажера на Нижнетагильском металлургическом комбинате и в Уральском федеральном университете имени первого президента России Б.Н. Ельцина для повышения уровня квалификации специалистов и подготовки студентов.

Описание лабораторных работ, проводимых в УрФУ, разработанных А.В. Сучковым под руководством В. Г. Лисиенко для магистров кафедры Автоматики, приведено в Приложении.

Эти лабораторные работы используются, в частности, в рамках поставленного автором учебного магистерского курса «Идентификация и управление в сложных саморегулирующихся системах».

18.5.8. Развитие логико-количественных и модельно-количественных экспертных систем

Как следует из предыдущего, важным шагом развития модельной поддержки экспертных систем является дополнение логических экспертных систем количественными соотношениями, т. е. разработка так называемых логико-количественных экспертных систем (ЛКЭС). Подведем некоторые итоги.

В качестве первого шага для построения количественных моделей для управления доменным процессом предложено использовать теорию и модели теплового состояния доменной печи в разработке научной школы Б.И. Китаева. Как известно, в рамках этой теории проводится зональный анализ теплового состояния доменной печи автономно для «верха» – верхней зоны – шахты и «низа» – ниж-

ней зоны – горна доменной печи (в дальнейшем условно применяются термины «верх» и «низ» [18.15; 18.67; 18.68; 18.96–18.98; 18.133–18.139]. В дальнейшем использована также детализированная модель доменного процесса, балансовая логико-статистическая модель института металлургии УрО РАН [18.37; 18.101–106].

При этом в соответствии с принятым в ЛКЭС основным постулатом «отклонения от нормы» и с учетом требований технологической инструкции количественные модели нами предлагается также использовать в дискретной форме – в виде отклонений, но уже не только в виде качественных («больше», «меньше»), но и в виде количественных соотношений.

Предложено построить количественные модели управления с компенсацией по возмущению (инвариантная система) и по отклонению с определением количественных отклонений параметров состояния и управляющих воздействий от «нормы» в виде конечно-разностных – дискретных значений соответственно Δu_i и Δx_j . Естественно, что на первом шаге будут использоваться квазистатистические соотношения, а динамические переходные процессы могут составлять предмет соответствующего совета в виде предсказаний времени переходного процесса, времени запаздывания и постоянной времени $\tau_{\text{зап}}$ и T – соответственно.

В частности, для низа печи управляющие воздействия часто принимаются как «быстрые», в то время как для воздействий сверху дается определение «медленных» со временем запаздывания $\tau_{\text{зап}} = 5\text{--}6$ ч и постоянными времени в пределах $T = 6\text{--}12$ ч.

Количественные модели с компенсацией по возмущению предложено использовать в двух вариантах – в виде модели эквивалентного сохранения и модели критериального отклонения.

Модель эквивалентного сохранения включает отклонения от нормы управляющих воздействий, которые обеспечивают сохранение уровня важнейших критериев теплового состояния для верха и низа печи. Такими критериями приняты индексы верха i_v и низа i_n доменной печи (подробнее см. п. 18.5.4).

В алгоритме количественных моделей управления с компенсацией по возмущению и по отклонению предлагается для заданных условий работы доменной печи заранее (на основании принятых критериев и полных моделей с учетом особенностей работы печей, которые в данном случае выполняют роль имитационно-оптими-

зирующего уровня) определять степень воздействия управляющих воздействий на критерии (индексы) теплового состояния верха и низа печи и приводить в модели их дискретное изменение в соотношении с эквивалентными дискретными величинами других управляющих воздействий, необходимых для поддержания критериев состояния на постоянном (заданном) уровне (норма).

Именно такого рода модели на первом этапе и могут служить в качестве моделей реального времени для верхнего уровня управления тепловой работой доменной печи.

Для количественных моделей первого типа (моделей эквивалентного сохранения) подобный алгоритм может быть выражен в виде компенсационного уравнения (компенсация по возмущению), связывающего все отклонения управляющих и возмущающих воздействий и приводящего их к эквивалентному (по воздействию на определенный критерий) значению.

Для моделей второго типа (моделей критерияльного отклонения) применяется в качестве исходного дискретное отклонение от нуля определяющего индекса или другого определяющего параметра состояния. Модели второго типа обеспечивают управление доменной печью по отклонению определяющих параметров.

Таким образом, разработка количественных управляющих воздействий на ход доменной плавки предусматривает оценку теплообменных, восстановительных и газодинамических процессов, их стабилизацию или изменение в необходимых пределах. Комплексность воздействия различных параметров на ход доменной печи позволяет решать вопросы экономичности плавки, возможности изменения ее интенсивности и управления протеканием процессов как автономно для верха и низа доменной печи, так и во всем ее объеме.

Исходные положения и характеристики количественных моделей, изложенных выше, и легли в основу разработки и способа связанного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь (см. п. 18.5.5) [18.39; 18.157-18.159]. Преимуществом данного способа управления доменной печью является управление основными энергоносителями - управляющими воздействиями доменной печи в автоматическом режиме без непосредственного участия оператора, что повышает точность и надежность управления, исключает возможность субъективных ошибок. Кроме того, уставки регуляторам соотношений определяются из условий эффектив-

ной работы одновременно как верха, так и низа доменной печи. Это в результате приводит к снижению расходов основных энергоносителей - кокса, природного газа (топливных добавок), и кислорода и обеспечивает протекание ровного хода доменной печи. С точки зрения авторов, способ управления доменной печью и представленные алгоритмы, являются своеобразным предвестником управления сложным объектом - доменной печью не только в режиме советчика, но и с использованием замкнутых контуров управления и контроля.

Особенностями отличается разработанная система диагностики предаварийного и даже аварийного состояния доменной печи как основы противоаварийной экспертной системы.

Наконец, важнейшим этапом в развитии экспертных систем доменного процесса стало создание в разработке УрФУ модельно-количественной экспертной системы, в состав которой впервые была введена действующая математическая модель доменной печи (см. п. 18.5.7).

Опыт построения логико-количественных (ЛКЭС) и модельно-количественных (МКЭС) экспертных систем для управления доменной печью может быть использован для управления такими энергоэкологоэффективными процессами в металлургии, как процессы прямого легирования стали и сплавов. В первую очередь это касается прямого легирования стали ванадием, выплавки ферроникеля из бедных окисленных никелевых руд (соответственно процессы ЛП-В и ЛП-Н), разработки УГТУ-УПИ (УрФУ) и других организаций), прямого легирования марганцем (разработки под руководством В.П. Лякишева) [18.2]. Актуальность указанных разработок обусловлена дороговизной кокса, а главное, трудностями реализации получения высоколегированных сталей и сплавов в переделах с использованием кокса. При этом был учтен опыт, накопленный при создании конструкторов экспертных систем и тренажеров мастера доменной печи: процесса ПЖВ - агрегат РОМЕЛТ на основе логического моделирования и законов нечеткой логики. Результатами исследований, как выше было показано, стали: моделирование представления знаний в логико-количественных экспертных системах управления доменным и альтернативным бескоксовыми процессами в металлургии; разработка информационного обеспечения, в том числе баз данных, алгоритмического и программного обеспечения ЛКЭС для управления (в режиме советчика) энергоэкологоэффективными (в том

числе бескоксовыми процессами); использование когнитивного моделирования технологий инженерии знаний при разработке логико-количественных экспертных систем.

18.5.9. Моделирование и диагностика использования пылеугольного топлива в доменной печи

Эта часть работы выполнена А.В. Сучковым под руководством В. Г. Лисиенко.

Подача пылеугольного топлива в доменную печь

Снижение расхода кокса при выплавке чугуна является определяющей статьей повышения экономичности и эффективности доменного производства. Эффективным топливом для доменной плавки является угольная пыль, подаваемая в горн доменной печи вместе с горячим дутьем; она позволяет заместить в доменной печи 20–40 % кокса и 100 % природного газа (использование которого становится все менее выгодным из-за повышения цены). В настоящее время пылеугольное топливо (ПУТ) широко используется в европейских странах, Японии, Китае, в России применяется на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате (НТМК) [18.180-18.189; 18.192; 18.193]. На практике достигнуты расходы ПУТ 170–200 кг/т чугуна, это эквивалентно снижению расхода кокса на 150–170 кг/т чугуна [18.180]. В [18.181] отмечается, что эффективность замены кокса пылеугольным топливом в 2-2,5 раза выше, чем природным газом. Важное значение имеет и доступность углей, используемых для приготовления угольной пыли. Для этих целей могут использоваться энергетические угли марок: Т (тощий), Г (газовый), А (антрацит), а в качестве добавок при размоле могут использоваться угли других марок, в том числе бурые. Можно сделать вывод о перспективности применения пылеугольного топлива на российских металлургических предприятиях и об актуальности исследований различных вариантов его использования.

Выделяют два этапа внедрения технологии использования пылеугольного топлива. На первом этапе количество подаваемой угольной пыли составляет до 120–140 кг/т чугуна, второй этап характеризуется подачей большего ее количества (до 260 кг/т чугуна

на лучших зарубежных печах). Такое разделение связано с тем, что для реализации первого варианта на доменных печах России необходимо только оборудование для подачи пылеугольного топлива, осуществление же второго этапа невозможно без проведения дополнительных дорогостоящих мероприятий [18.182; 18.183]: снижения выхода шлака до 300 кг/т чугуна, повышения температуры дутья до 1150–1200 °С сокращения доли мелочи 0–5 мм в доменной шихте до 5–8 %, значительного улучшения качества кокса и др.

Применяемые способы подготовки и подачи ПУТ включают в себя систему размола угольной пыли до частиц определённого размера (не более 7–30 мкм), специальные топки для сушки пыли, систему двухстадийной очистки, пылевые циклоны (см. например, схему в [18.184]). При отсутствии места для размещения этого оборудования вблизи доменной печи, оно может располагаться на некотором удалении (на расстоянии до 1 км); транспортировка ПУТ к доменной печи осуществляется по трубопроводам, при этом для обеспечения взрывопожаробезопасности дополнительно используется азот.

В 2012 г. на НТМК при выплавке ванадиевого чугуна на доменных печах 2000 м³ пылеугольное топливо применено одновременно с природным газом.

В. Г. Лисиенко предложен метод вдувания в доменную печь угольной пыли, предварительно увлажненной до 12 %, который обеспечивает взрывопожаробезопасность, снижение абразивного воздействия на трубопроводы, уменьшение диаметра подающих трубопроводов, уменьшение содержания золы в топливе, достаточно высокий коэффициент замены кокса углем (до 0,8–1 кг кокса/кг угля). Особенностью предложенного способа является размол угольного топлива в мокром состоянии с добавлением воды в размольную мельницу до 25 % и последующей корректировкой содержания влаги до 30 % в смесительном устройстве, а также отделением зольной составляющей угля в центрифуге до содержания влаги 10–12 % с последующей подачей на фурмы доменной печи [18.186].

Для обоснования предложенного способа в [18.186] приведены результаты предварительных расчётов, показывающие незначительное увеличение расхода кокса (до 10 кг/т чугуна) из-за повышения содержания влаги в ПУТ до 12 %, что, тем не менее, компенсируется снижением количества золы в угольной пыли. В этом же источнике указывается снижение температуры горна как негативный резуль-

тат увлажнения пылеугольного топлива, однако не учитывается тот факт, что при подаче угольной пыли вместо природного газа температура горна возрастает и некоторое снижение температуры в горне является положительным явлением.

Состав угольной пыли при реализации способа подачи увлажненного до 12 % ПУТ отличается от существующих главным образом повышенным содержанием в ПУТ влаги. Расчеты для исследования последствий этого отличия ранее не проводились. Ниже проведено исследование зависимости расхода кокса и других показателей доменной плавки от количества ддуваемой угольной пыли и содержащейся в ней влаги применительно к условиям работы ряда отечественных доменных печей [18.137; 18.187].

Зависимость расхода кокса от количества и влажности пылеугольного топлива

Исследования проводились с помощью комбинированной модели доменного процесса Института металлургии УрО РАН и УрФУ (см. п. 18.5), которая позволяет учитывать подачу пылеугольного топлива и его параметры при расчете показателей плавки. Для исследования использовалось многократное моделирование с разными условиями для получения статистических данных. Были взяты известные параметры и условия работы восьми печей. Это доменные печи НТМК, Северстали, Чусовского металлургического завода, металлургического завода им. А.К. Серова, Орско-Халиловского металлургического комбината объемом от 205 до 2700 мЗ.

Проведены расчеты выходных показателей печей при различных значениях таких величин, как количество угольной пыли и содержание в ней влаги, количество природного газа, степень обогащения дутья кислородом. Во всех вариантах моделирования производительность доменных печей принималась постоянной; использовались параметры угольной пыли, приготовленной из тощих марок углей: содержание золы 12 %, летучих 12 %, влаги 1 %, если не указано иного.

В источниках [18.182; 18.183] и других предлагается величина коэффициента компенсации ПУТ–ПГ, равная 0,45–0,58 м³/кг; в настоящей работе использовано значение 0,5 м³/кг, т. е. при увеличении подачи угольной пыли на 1 кг/т чугуна необходимо снизить расход природного газа на 0,5 м³/т чугуна (в частности, такой коэф-

коэффициент компенсации используется для зависимостей на рис. 18.62; 18.64, табл. 18.19).

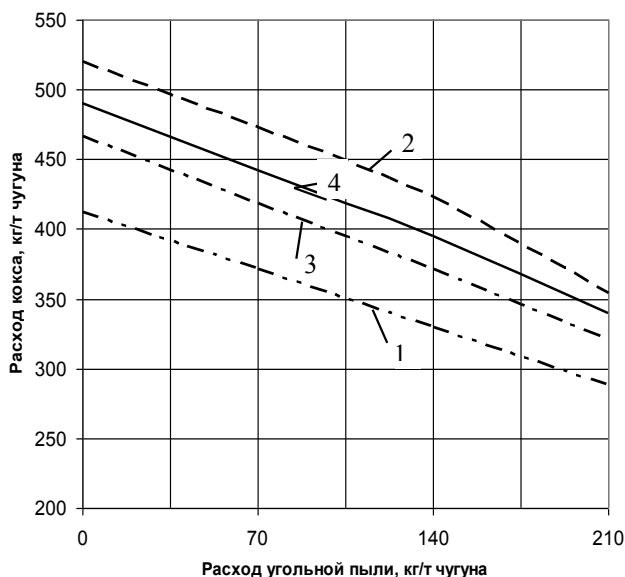


Рис. 18.62. Зависимость расхода кокса от количества подаваемой угольной пыли для четырех доменных печей: V — объем доменной печи для линий 1, 2, 3, 4, соответственно, м^3 1719, 1033, 2600, 1719

На рис. 18.62 приведена зависимость расхода кокса от количества угольной пыли для четырех доменных печей. Можно отметить сходный вид графиков для всех печей, различное же положение по высоте является следствием отличия остальных параметров (состав шихты, температура и влажность дутья — эти параметры отличаются для всех печей). На рис. 18.63 показано изменение расхода кокса в зависимости от влажности угольной пыли при ее подаче в количестве 140 кг/т чугуна.

В табл. 18.19; 18.20 и на рис. 18.64, 18.65 представлены результаты расчётов для доменной печи объемом 1719 м^3 , производительностью 3450 т/сутки, температурой дутья 1176°С. Отметим, что аналогичные тенденции при изменении расхода угольной пыли и содержания в ней влаги были получены и по другим печам.

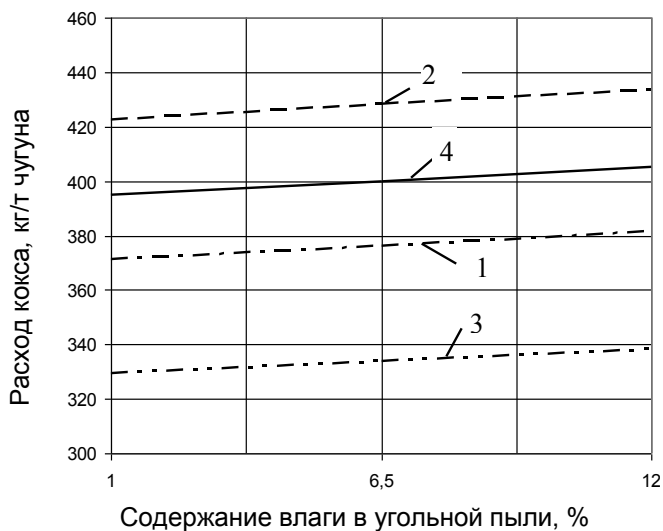


Рис. 18.63. Зависимость расхода кокса от содержания влаги в угольной пыли, при подаче пыли в количестве 140 кг/т чугуна; объем доменной печи для линий 1, 2, 3, 4, соответственно, м³ 1719, 1033, 2600, 1719

Таблица 18.19

Значения удельного расхода кокса (кг/т чугуна) для различного количества угольной пыли и содержания в ней влаги; подача природного газа отсутствует

Угольная пыль, кг/т чугуна	Содержание влаги в угольной пыли, %				
	1,0	3,75	6,5	9,25	12,0
0	558,4	558,4	558,4	558,4	558,4
70,0	485,6	486,9	488,2	489,5	490,8
140,0	412,8	415,4	418,0	420,6	423,1
210,0	340,0	343,9	347,7	351,6	355,5

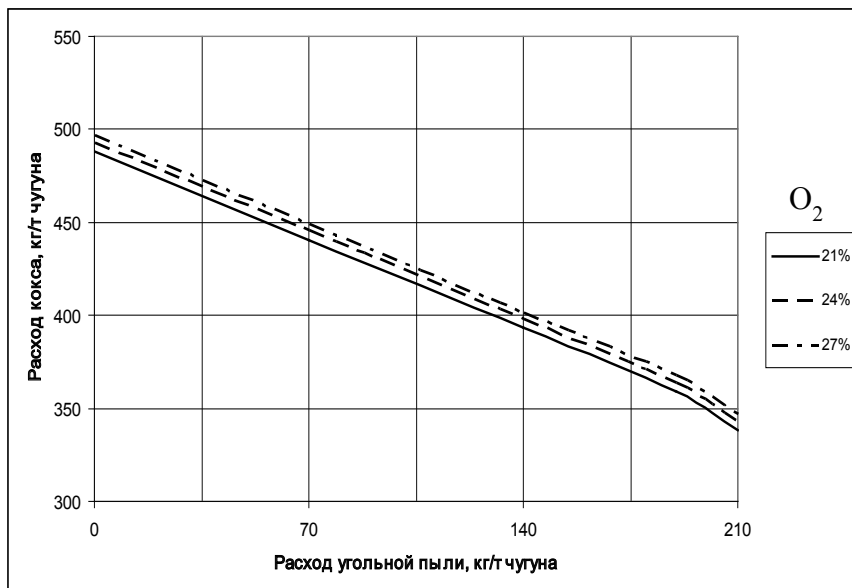


Рис. 18.64. Зависимость расхода кокса G_k от расхода угольной пыли при содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

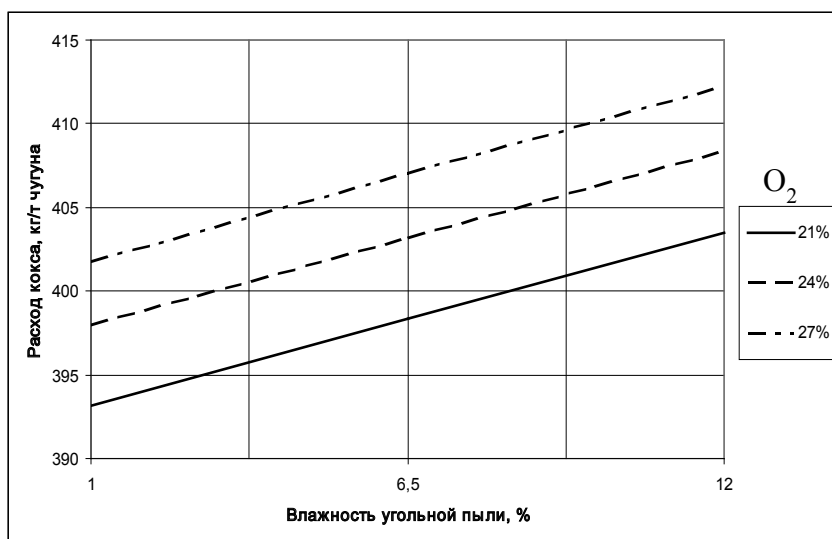


Рис. 18.65. Зависимость расхода кокса от количества влаги в угольной пыли при расходе угля 140 кг/т чугуна и содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

Таблица 18.20

Значения удельного расхода кокса (кг/т чугуна) для различного количества угольной пыли, содержания в ней влаги при подаче природного газа

Угольная пыль, кг/т чугуна	Природный газ, м ³ /т чугуна	Содержание влаги в угольной пыли, %				
		1,0	3,75	6,5	9,25	12,0
0	95,0	489,8	489,8	489,8	489,8	489,8
70,0	60,0	442,3	443,6	444,8	446,1	447,4
140,0	25,0	394,7	397,3	399,9	402,5	405,1
210,0	0	340,0	343,9	347,7	351,6	355,4

Анализ полученных зависимостей. Зависимости расхода кокса от содержания влаги в угольной пыли, а также расхода кокса от количества ПУТ получились близкими к линейным в пределах рассматриваемых значений параметров при постоянстве остальных величин. Если рассматривать количество подаваемой пыли до 140 кг/т чугуна, можно сделать следующие выводы. При увеличении влажности ПУТ (подаваемого в количестве 140 кг/т чугуна) на 1 %, расход кокса увеличивается на 0,78–1,37 кг/т чугуна (в среднем 1,02 кг/т чугуна). Увеличение подачи пылеугольного топлива на 1 кг/т чугуна (при отсутствии дополнительного увлажнения и подачи природного газа) обуславливает снижение расхода кокса на 0,99–1,12 кг/т чугуна (в среднем 1,06 кг/т чугуна). При одновременном изменении подачи природного газа в соответствии с коэффициентом компенсации ПУТ–ПГ, равным 0,5 м³/кг, увеличение расхода пыли на 1 кг/т чугуна позволит снизить расход кокса на 0,56–0,69 кг/т чугуна (в среднем 0,64 кг/т чугуна).

Сопоставим величину коэффициента замены, найденного методом моделирования, с данными, присутствующими в других источниках. В работе [18.192] дана величина коэффициента замены кокса пылеугольным топливом без подачи природного газа 1,12–1,17 кг кокса/кг ПУТ, в работе [18.193] величина 0,99–1,09 кг кокса/кг ПУТ (для зарубежных печей). При подаче ПУТ и одновременном снижении расхода природного газа с коэффициентом замещения ПУТ–ПГ

$K_k = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ приводится величина коэффициента замены кокса угольной пылью 0,6-0,65 [18.182; 18.183]. Полученные в процессе данного исследования результаты, таким образом, близки к расчетным и практическим данным из других источников, что дополнительно подтверждает адекватность используемой математической модели.

Рассмотрим обобщенные зависимости, характеризующие расход кокса при подаче ПУТ, полученные в результате моделирования подачи ПУТ для условий восьми доменных печей. Изменение величины расхода кокса при изменении количества угольной пыли, содержания в ней влаги и золы:

$$\Delta G_k = -K \cdot \Delta G_{\text{уп}} + \Delta G_k^B + \Delta G_k^3, \quad (18.240)$$

где ΔG_k – изменение величины расхода кокса, кг/т чугуна;

K – числовой коэффициент, характеризующий изменение расхода кокса в зависимости от количества вдуваемой в горн угольной пыли, доли ед.;

$\Delta G_{\text{уп}}$ – изменение количества подаваемой угольной пыли, кг/т чугуна;

ΔG_k^B – изменение расхода кокса при изменении содержания влаги в пыли, кг/т чугуна;

ΔG_k^3 – изменение расхода кокса при изменении содержания золы в пыли, кг/т чугуна.

Отношение $\Delta G_k / \Delta G_{\text{уп}}$ является коэффициентом замены кокса пылеугольным топливом.

Первое слагаемое в выражении (18.240) выражает изменение расхода кокса при изменении количества угольной пыли с начальным значением содержания влаги и золы. Второе и третье слагаемые отражают изменение расхода кокса вследствие изменения содержания соответственно влаги и золы в пылеугольном топливе. Величину ΔG_k^B можно выразить следующим образом:

$$\Delta G_k^B = K_v \cdot G_{\text{уп}} \cdot \Delta W_{\text{уп}}, \quad (18.241)$$

где $\Delta W_{\text{уп}}$ – изменение содержания влаги в угольной пыли (разница конечного и начального значений), %;

$G_{\text{уп}}$ – количество подаваемой угольной пыли, кг/т чугуна;

K_b – коэффициент, характеризующий расход кокса в зависимости от содержания влаги в пыли, зависящий от параметров печи и процесса плавки, доли ед.

Результаты моделирования показали, что коэффициенты K , K_b , а следовательно величины ΔG_k , ΔG_k^b , не зависят от подачи/неподачи природного газа (в случае постоянного расхода) вместе с дутьем, но зависят от параметров дутья – содержания кислорода, температуры дутья. Величины ΔG_k и ΔG_k^b при изменении температуры в пределах 1000-1300 °С и содержания кислорода в дутье в пределах 21–27 % изменяются незначительно, в пределах нескольких процентов.

Зависимость теплового состояния печи от количества и влажности пылеугольного топлива

На рис. 18.66, 18.67 представлены зависимости температуры колошникового газа и температуры фурменного очага от количества угольной пыли при одновременном пропорциональном изменении расхода природного газа; на рис. 18.68, 18.69 приведены зависимости тех же параметров от содержания влаги в ПУТ. На каждом графике приведены три зависимости, характеризующие различное содержание в дутье кислорода.

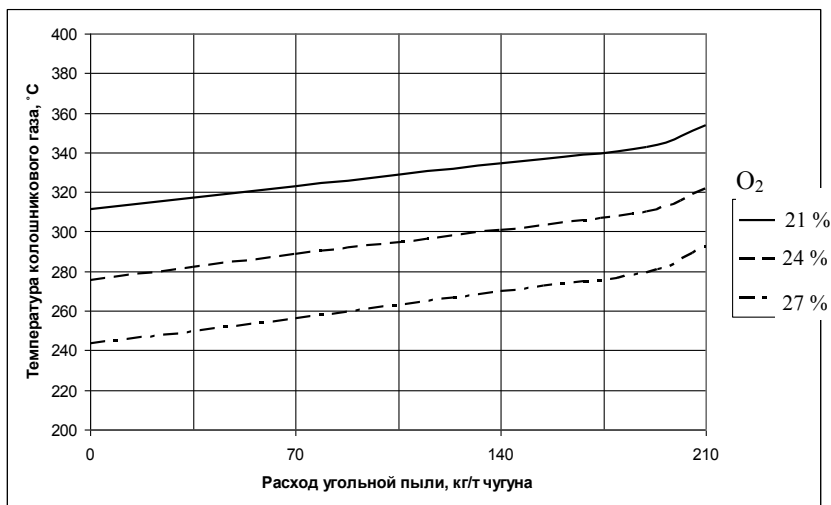


Рис. 18.66. Зависимость температуры колошникового газа T_k от расхода угольной пыли при содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

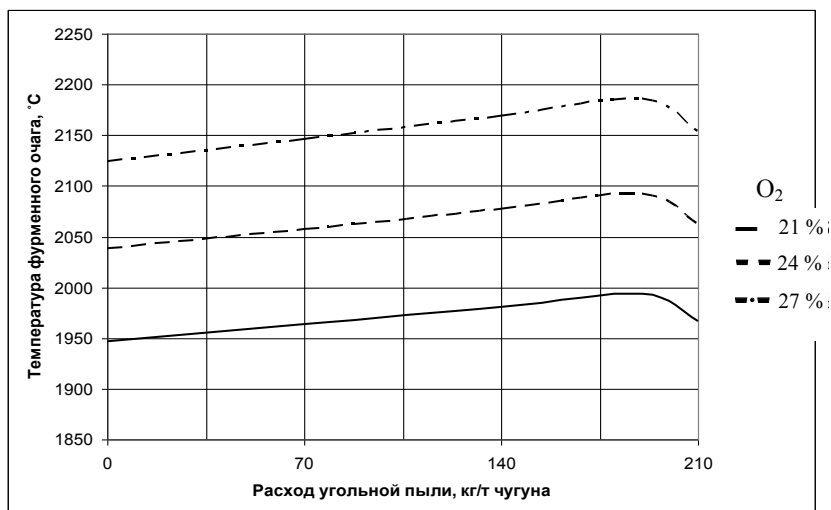


Рис. 18.67. Зависимость температуры фурменного очага $T_{\text{ф}}$ от расхода угольной пыли при содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

На рис. 18.66, 18.67 зависимость близка к линейной до уровня подачи угольной пыли 190 кг/т чугуна. После этого значения вид зависимости меняется. Связано это с тем, что при расходе пылеугольного топлива от 0 до 190 кг/т чугуна присутствует подача природного газа, причем величина, на которую сокращается количество природного газа, пропорциональна расходу угольной пыли; при подаче пылеугольного топлива более 190 кг/т чугуна подача природного газа отсутствует.

Влияние количества угольной пыли и содержания в ней влаги на температурные параметры печи. При повышении расхода угольной пыли можно отметить увеличение температур колошникового газа и фурменного очага, но заметное снижение последнего показателя при дополнительном увлажнении угольной пыли.

Сопоставим полученные зависимости температур от параметров ПУТ (рис. 18.66–18.69) с изменениями индексов теплового состояния, приведенными на рис. 18.70, 18.71. Исследования проводились для одной печи и одинаковых условий. Можно отметить сходство изменения индекса теплового состояния верхней зоны и температуры колошникового газа, а также индекса теплового состояния ниж-

ней зоны и температуры фурменного очага. Однако имеются различия, например, при повышении расхода ПУТ от 0 до 140 кг/т чугуна изменение индекса верха составляет около 12 %, температуры фурменного очага лишь около 2 %; увлажнение угольной пыли незначительно снижает значение индекса верха, но при этом наблюдается некоторое повышение температуры колошникового газа. Таким образом, индексы теплового состояния не могут быть отождествлены с конкретными значениями температур фурменного очага и колошникового газа.

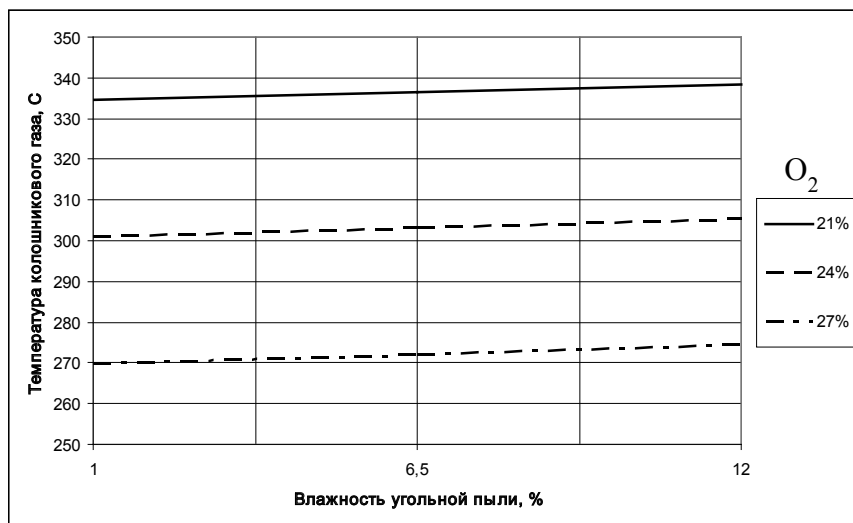


Рис. 18.68. Зависимость температуры колошникового газа от количества влаги в угольной пыли при расходе угля 140 кг/т чугуна и содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

Имеются предложения замены природного газа угольной пылью с повышением содержания влаги в дутье на величину до 20 г/м³ для компенсации перегрева горна [18.181]. Например, на НТМК реализована частичная замена природного газа угольной пылью. Влага, поступающая с угольной пылью, не является как-либо связанной с ней на молекулярном уровне, поэтому может являться заменой влаги дутья. Так как количество влаги, содержащейся в пылеугольном топливе, принято выражать в % от его массы, а влагу дутья в г/м³,

сопоставление этих величин напрямую затруднительно. Оценим, какому количеству влаги дутья соответствует повышение влажности угольной пыли с 1 % до 12 % при подаче ПУТ в количестве 140 кг/т чугуна.

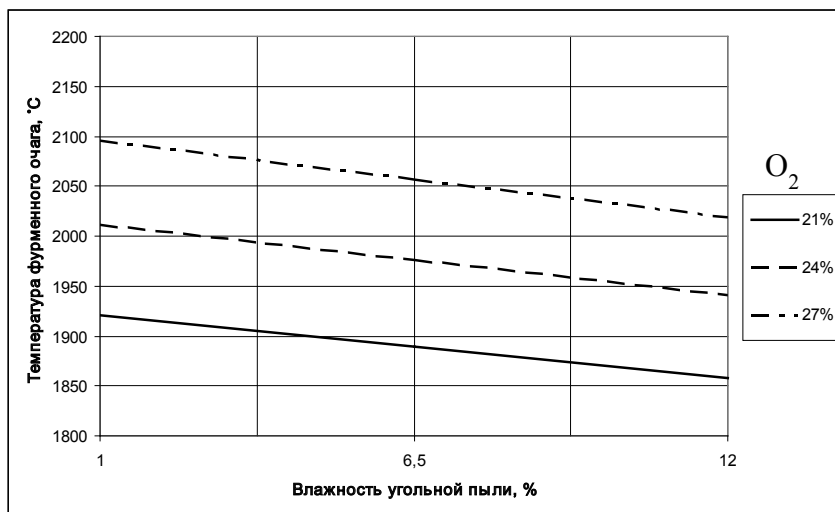


Рис. 18.69. Зависимость температуры фурменного очага от количества влаги в угольной пыли при расходе угля 140 кг/т чугуна и содержании кислорода в дутье 21 %, 24 %, 27 %

При изменении количества влаги, поступающей с угольной пылью, величина этого изменения (в кг/т чугуна) может быть выражена как:

$$\Delta W_{\text{уп}}^{\text{уд}} = G_{\text{уп}} \cdot \Delta W_{\text{уп}} / 100, \quad (18.242)$$

где $G_{\text{уп}}$ — расход угольной пыли, кг/т чугуна;

$\Delta W_{\text{уп}}$ — увеличение содержания влаги в угольной пыли, %.

Для расчета соответствующего количества влаги дутья Δf (г/м³) требуется привести количество влаги в угольной пыли к м³ дутья, то есть:

$$\Delta f = 1000 \cdot \Delta W_{\text{уп}}^{\text{уд}} / G_{\text{д}}, \quad (18.243)$$

где $G_{\text{д}}$ — удельный расход дутья (м³/т чугуна). Эта величина составляет 900–1500 м³/т чугуна для разных печей.

С учетом уравнения (18.242) установлено, что величина Δf может изменяться от $G_{\text{уп}} \cdot \Delta W_{\text{уп}} / 150$ до $G_{\text{уп}} \cdot \Delta W_{\text{уп}} / 90$.

Увеличение влажности ПУТ с 1 до 12 % (при подаче 140 кг/т чугуна угольной пыли) будет соответствовать увеличению влажности дутья на величину от 10 до 17 г/м³ в зависимости от количества дутья.

Изменение индексов теплового состояния верха и низа доменной печи при замещении природного газа пылеугольным топливом (обычной и повышенной влажности).

При увеличении подачи (до 140 кг/т чугуна) угольной пыли и снижении количества природного газа (сокращение составляет 0,5 м³/т чугуна на каждый дополнительный 1 кг/т чугуна угольной пыли) происходит нагрев шахты печи и увеличение значений индекса верха i_v (рис. 18.70).

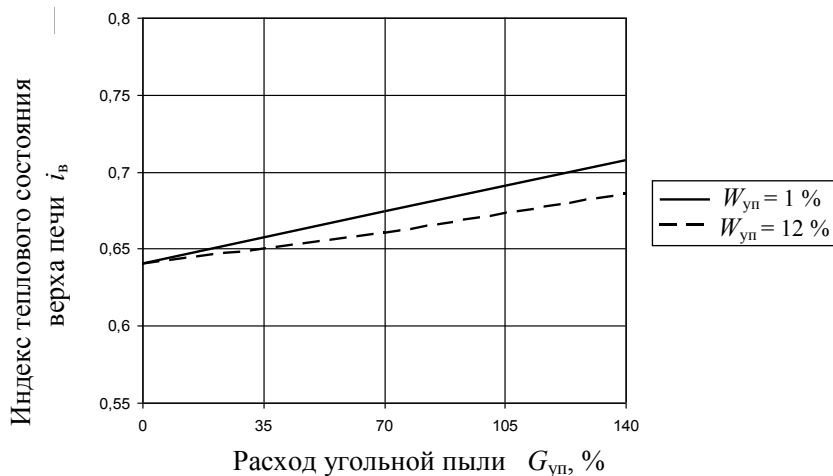


Рис. 18.70. Изменение индекса теплового состояния верха печи при замене природного газа пылеугольным топливом

Вид зависимости индекса низа от расхода пылеугольного топлива больше зависит от содержания в нем влаги (см. рис. 18.71). Это связано с тем, что увлажнение угольной пыли оказывает большее воздействие на тепловое состояние нижней части печи.

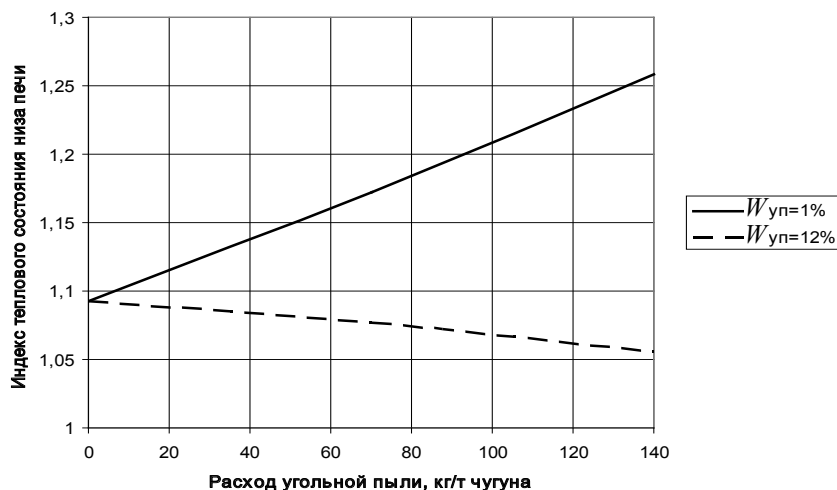


Рис. 18.71. Изменение индекса теплового состояния низа печи при замене природного газа пылеугольным топливом

По полученным зависимостям можно сделать следующие выводы. При повышении расхода неувлажненного пылеугольного топлива от 0 до 140 кг/т чугуна (и снижении расхода природного газа, равном $0,5 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна на каждый дополнительный 1 кг/т чугуна угольной пыли) через «время сдвига» около двух часов содержание кремния в чугуне на выпуске будет выше, по сравнению с исходным, приблизительно на 0,3 %. Подача увлажненного (до 12 %) пылеугольного топлива в данных условиях приводит к некоторому снижению значения индекса теплового состояния низа печи, а также, в частности, к снижению содержания кремния.

Рекомендации по использованию угольной пыли в сочетании с другими параметрами дутья

Обобщая результаты расчетов по подаче увлажненного пылеугольного топлива в доменную печь, можно сказать следующее:

- для максимальной экономии кокса желателен как можно больший расход ПУТ, однако существующие на Российских предприятиях характеристики шихты и дутья ограничивают расход ПУТ величиной 140 кг/т чугуна;

- увлажнение ПУТ по сравнению с увлажнением дутья имеет ряд преимуществ, в частности, снижение взрывопожаробезопасности (что позволяет не использовать азот для транспортировки ПУТ), снижение абразивного воздействия на трубопроводы;
- при подаче ПУТ в горн доменной печи в количестве около 140 кг/т чугуна необходимо охлаждение горна, которое может быть достигнуто при помощи повышения влажности дутья на 7–13 г/м³ или увеличения содержания влаги в угольной пыли на 5–14 % (зависит от состава ПУТ, параметров шихты и дутья).

В том случае, если при подаче ПУТ 140 кг/т чугуна требуется (для поддержания необходимого распределения температур) увеличение влажности угольной пыли до 10–12% (что может быть рассчитано при помощи компьютерного моделирования), такой режим является рекомендуемым. Он реализуем для достаточно современных печей с высоким содержанием кислорода в дутье.

В случае подачи ПУТ, увлажненного до 10–12 % и необходимости при этом в дополнительном охлаждении горна, может использоваться (помимо повышенного увлажнения ПУТ):

- повышение влаги в дутье;
- снижение содержания кислорода в дутье (что более негативно скажется на производительности);
- снижение расхода ПУТ и пропорциональное повышение расхода природного газа. Дальнейшее повышение влажности ПУТ для данной ситуации является не столь эффективным. Повышенный нагрев горна и необходимость в более активном его охлаждении может возникнуть, в частности, при величине коэффициента компенсации ПУТ-ПГ 0,6–0,7 м³/кг, что не столь эффективно, но может использоваться при дефиците природного газа (например, предлагается для условий украинских предприятий [18.189]).
- При подаче ПУТ в количестве 140 кг/т чугуна и влажности ПУТ 10–12 % может присутствовать необходимость в повышении нагрева горна. В таком случае может быть использован один из следующих вариантов:
- увлажнение ПУТ до 10–12 % при увеличении содержания кислорода в дутье для достижения требуемой температуры фурменного очага;

- увлажнение ПУТ до уровня менее 10 %, что обеспечивает несколько меньшую пожаробезопасность;
- увлажнение дутья до необходимого значения.

Наконец, в случае ухудшения газопроницаемости шихты может потребоваться уровень подачи угольной пыли ниже 140 кг/т чугуна, которая заменяется соответствующим объемом природного газа (с коэффициентом компенсации 0,5 м³/кг). В таком случае возрастает расход кокса.

Анализ экономической эффективности использования пылеугольного топлива в доменной печи

Проведена оценка экономической эффективности подачи угольной пыли в доменную печь по способу, предложенному в [18.186], для условий российских металлургических заводов; при этом ограничимся рассмотрением первого этапа внедрения пылеугольного топлива (в количестве 140 кг/т чугуна). Необходимо отметить, что уровень расхода кокса в предлагаемом способе приблизительно равен расходу кокса при подаче угольной пыли общепринятыми способами; различия заключаются в методе подачи влаги в горн доменной печи, а также в оборудовании, которое служит для подачи ПУТ.

Для экономической оценки проекта необходимо было рассчитать снижение расходов на топливо в единицу времени в результате внедрения новой технологии и соотнести с требуемыми капитальными затратами. Предлагалось найти такие показатели эффективности инвестиций, как срок окупаемости и чистый приведенный эффект. Первая величина позволяет оценить срок, в течение которого полученная суммарная прибыль превысит сумму первоначальных инвестиций, вторая – на сколько прибыль за время эксплуатации оборудования превысит капитальные затраты на проект. В работе [18.188], где проводился подобный расчет, не учитывалась стоимость угля и природного газа, рассчитывалась только экономия за счет снижения расхода кокса, не указан состав ПУТ, объем инвестиций в переоборудование печи задан без обоснований и представляется заниженным.

Основные исходные данные. Рассмотрена доменная печь рабочим объемом 1719 м³. Производительность ее составляет 3450 т чугуна/сутки. Количество вдуваемой угольной пыли принято 140 кг/т

чугуна. При этом подача пылеугольного топлива увеличивается постепенно до достижения этого объема ввиду сложности технологии и необходимости регулирования всех остальных систем печи. По аналогии с [18.188], принято внедрение технологии в 2 этапа: первые шесть месяцев происходит вдувание пыли в количестве 70 кг/т чугуна, далее 140 кг/т чугуна. Коэффициент компенсации ПУТ–ПГ $K_k = 0,5$.

Использованы расчеты (см. табл. 18.20), в которой приведены данные для рассматриваемой печи. Коэффициент замены кокса пылеугольным топливом составляет 0,61 для угольной пыли с содержанием влаги $H_2O = 12\%$.

Расчетные данные. Два этапа внедрения технологии подачи ПУТ:

1) $G_{уп} = 70$ кг/т чугуна, $G_{пр} = 60$ м³/т чугуна, $G_k = 447,4$ кг/т чугуна;

2) $G_{уп} = 140$ кг/т чугуна, $G_{пр} = 25$ м³/т чугуна, $G_k = 405,1$ кг/т чугуна.

Здесь $G_{уп}$ – расход угольной пыли, $G_{пр}$ – расход природного газа, G_k – расход кокса.

Для оценки экономических показателей необходим учет стоимости трех видов топлива для доменной печи. Например, цена предложения на доменный кокс в ноябре 2009 г. составила около 7500 руб. за тонну. Производство угольной пыли (помол угля) происходит на металлургическом предприятии. Расчеты проводились для тощего угля, стоимость его в 2009 г. составляла около 1700 руб. за тонну. Стоимость природного газа в 2009 г. составила около 2000 руб. за тысячу м³ для промышленных предприятий. Рабочий период доменной печи в год составляет около 360 суток (при ежегодном проведении ремонта III разряда, продолжительностью 3–4 суток в соответствии с [18.191]), в расчетах один месяц принят равным 30 суток.

В качестве единичного отрезка времени для расчетов принят один месяц. Тогда, согласно [18.190; 18.191], срок окупаемости ВВ рассчитывается по выражению:

$$ВВ = \min n, \text{ при котором } \sum_{k=1}^n \frac{B_k}{(1+r)^k} > IC, \quad (18.244)$$

где B_k – величина прибыли в k -ом месяце, руб.;

IC – величина инвестиций, руб.;

r – коэффициент дисконтирования, доли ед.

Годовой коэффициент дисконтирования, который можно соотнести со ставкой рефинансирования Центрального банка Российской Федерации, принимается равным 12 %. Тогда месячный составит 1 % или 0,01.

Общая стоимость оснащения доменной печи оборудованием для подачи угольной пыли IC составляет 30–60 млн. долларов [18.189], или около 900—1800 млн. руб. Разница обусловлена особенностями каждого доменного цеха, а также количеством печей предприятия, на которых внедряется технология (при переводе нескольких печей это обходится дешевле из-за наличия общего оборудования). Таким образом, необходимо было найти величину ежемесячной прибыли B_k :

$$B_k = B_k^{уд} \cdot P_k, \quad (18.245)$$

где $B_k^{уд}$ – среднее снижение себестоимости одной тонны чугуна в k -ом месяце, руб./т;

P_k – производительность печи в k -ом месяце, т/мес.

Снижение себестоимости одной тонны чугуна за счет вдувания пылеугольного топлива в k -ом месяце составляет:

$$B_k^{уд} = (\Delta G_k \cdot S_k + \Delta G_{пг} \cdot S_{пг} - \Delta G_{уп} \cdot S_{уп}) / 1000, \quad (18.246)$$

где ΔG_k , $\Delta G_{пг}$, $\Delta G_{уп}$ – изменение расхода кокса, природного газа и угольной пыли, кг/т чугуна, м³/т чугуна;

S_k , $S_{пг}$, $S_{уп}$ – стоимость одной тонны кокса, угольной пыли, тысячи кубометров чугуна соответственно, руб.

Для имеющихся исходных данных получено.

В первые 6 месяцев ($k = 1 \dots 6$):

$B_k^{уд} = 274$ руб./т чугуна; $P_k = 103500$ т; $B_k = 28307250$ руб. ≈ 28 млн. руб./мес.

В течение первых 6 месяцев дисконтированная величина прибыли ($\frac{B_k}{(1+r)^k}$ для $k = 6$) составит 164 млн. руб.

Для каждого последующего месяца:

$B_k^{уд} = 548$ руб./т чугуна; $P_k = 103500$ т; $B_k \approx 56$ млн. руб./мес.

С учетом известной прибыли за первые 6 месяцев получен срок окупаемости, согласно (18.244): $BV = 20$ для $IC = 900$ млн. руб., $BV = 41$ для $IC = 1800$ млн. руб., таким образом, срок окупаемости

внедрения технологии для рассмотренной печи составит от 20 до 41 месяца в зависимости от величины единовременных затрат на оборудование.

В разных источниках приводились сроки окупаемости внедрения технологии вдувания пылеугольного топлива от 8 месяцев до 4 лет [18.182; 18.183; 18.11]. В первую очередь разница обусловлена изменяющейся ситуацией на рынке доменного кокса, а также учетом дополнительных факторов, зависящих от конкретного производства.

Чистый приведенный эффект с учетом величины дисконтирования вычисляется по формуле [18.189; 18.190]:

$$NPV = \sum_k \frac{B_k}{(1+r)^k} - IC. \quad (18.247)$$

Было принято, что печь была оснащена оборудованием для подачи угольной пыли во время капитального ремонта I или II разряда, и это оборудование работает, по крайней мере, до следующего капитального ремонта II разряда. Время между ремонтами II разряда для доменной печи составляет 5–8 лет [18.171]. Принято минимальное время работы оборудования равное пяти годам. Следовательно, величина k в формуле (18.247) равна 60.

Получено первое слагаемое в формуле (18.247) – 2837 млн. руб. \approx 2800 млн. руб. С учетом капитальных затрат IC , чистый приведенный эффект составит от 1000 млн. руб. до 1900 млн. руб. в течение срока эксплуатации, равного межремонтному периоду 5 лет.

Проведенные расчеты подтверждают высокую экономическую эффективность применения увлажненного пылеугольного топлива.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Сформированы рекомендации по использованию в доменных печах увлажненного пылеугольного топлива, что является актуальным для отечественной металлургической промышленности. Получены зависимости расхода кокса, температур фурменного очага и колошникового газа от количества подаваемой угольной пыли и содержания в ней влаги.

Найдены коэффициенты, характеризующие зависимости влияния степени влажности угольной пыли на расход кокса и другие параметры доменного процесса и позволяющие оценить эффективность применения подачи ПУТ.

Технология подачи в горн доменной печи увлажненного до 10–12 % ПУТ является более эффективной, чем используемая в настоящее время сухая (содержание влаги около 1 %) угольная пыль.

Данные, которые присутствуют в других источниках (коэффициенты замены кокса угольной пылью), согласуются с найденными при помощи проведенных расчетов с использованием балансовой модели, что подтверждает адекватность этой модели.

Сформирован ряд рекомендаций по использованию угольной пыли совместно с другими параметрами дутья.

Получены показатели экономической эффективности внедрения технологии подачи увлажненного ПУТ для доменных печей России и подтверждена актуальность внедрения такой технологии при замене природного газа и части кокса.

18.5.10. Прогнозные оценки параметров процесса получения высокофосфористого чугуна с прямым легированием редкоземельными металлами (РЗМ)

Для машиностроительной промышленности большое значение имеет повышение качества литейных чугунов. В этом плане перспективным является легирование чугунов РЗМ, обеспечивающее улучшение механических свойств чугуна и стали. РЗМ используется для получения качественных беспримесных сталей и высокопрочных чугунов. Повышение содержания фосфора в чугуне, как известно, способствует улучшению его литейных свойств. Получение фосфористых чугунов (феррофосфоры) обеспечивают такие «фосфорные» руды как используемая на Староуткинском металлургическом заводе (СтУМЗ) и руда бассейна Каратау (Казахстан) с содержанием P_2O_5 около 26 %. Среди известных фосфористых рудных месторождений именно Томторская руда (север Якутии, поселок Анабар) отличается при повышенном содержании фосфора (до 20 %) одновременным значительным содержанием редкоземельных металлов - La и Ce ($La_2O_3 \sim 15 \%$ и $CeO_2 \sim 15 \%$).

Прогнозные экспертные расчеты для оценки возможности выплавки и состава чугуна из Томторской руды выполнены коллективами НИТУ-МИСИС и УрФУ [18.195] с участием В. Г. Лисиенко. Эти расчеты демонстрируют возможности прогнозирования технологий новых самых сложных доменных процессов.

Этот процесс можно определить как процесс получения феррофосфора с прямым легированием чугуна РЗМ. При этом для повышения температуры горна предложено использовать плазменный нагрев, применение которого в металлургии и, в частности, при производстве чугуна освещено в ряде работ (см., например, [18.196; 18.197]). Кроме того, расчеты проводились с использованием в качестве топливных добавок пылеугольного топлива и коксового газа.

В табл. 18.21 приведены химические составы основных компонентов доменной шихты.

Таблица 18.21

Химический анализ железорудных компонентов шихты

Химическая формула	Фосфорная руда (Староуткинский металлургический завод)	Томторская руда (север Якутии, поселок Анабар)	Фосфорная руда (Казахстан, бассейн Каратау)
Fe_2O_3	1,80	29,38	0,92
FeO	0,30	-	0,90
CaO	39,08	2,70	49,11
MgO	3,80	0,19	2,65
SiO_2	19,18	2,90	9,63
Al_2O_3	1,60	4,70	1,67
MnO	0,29	0,30	0,07
P_2O_5	25,78	19,90	26,58
SO_3	0,18	0,93	0,15
TiO_2	-	5,10	-
V_2O_5	-	0,10	-
CO_2	9,99	3,90	8,32
$\text{H}_2\text{O}_{\text{гр}}$	1,15	3,50	1,60
La_2O_3	-	14,90	-
CeO_2	-	15,00	-
CaO/SiO_2	2,04	0,93	5,1

Аналитический расчет осуществлялся по методике Рамма-Похвистнева, которая включает составление материальных и тепловых балансов, оценку восстановительных и газодинамических характеристик процесса. Наряду с этим представляется ряд важных параметров плавки.

На основе проведенных расчетов были получены результаты показателей доменной плавки фосфористового РМЗ – содержащего чугуна, табл. 18.22. В качестве базового варианта приняты показатели выплавки феррофосфора на доменной печи объемом 145 м³ Староуткинского металлургического завода (СтУМЗ).

С помощью упрощенной методики Рамма-Похвистнева, разработанной в НИТУ-МИСИС на кафедре рудотермических процессов, проведены также расчеты возможного получения РМЗ – содержащего чугуна в плазменной доменной печи при использовании в шихте металлизированных окатышей в сравнении с базовым вариантом выплавки чугуна (см. табл. 18.23). Содержание кислорода в дутье принято 21 %. Дутье предполагается нагревать с помощью низкотемпературной плазмы, при этом расход электроэнергии в этом случае составит 1200 кВт·ч/т чугуна. Плазматрон устанавливается по оси подвижного колена фурменного прибора в целях снижения износа кладки в сопле. Для более экономичного производства электроэнергии в комплекс желательно включать теплоэлектростанцию, которая перерабатывала бы горячие восстановительные газы, отходящие из реактора плазмотрона. Это обеспечивало бы снижение расхода на производство электроэнергии.

Одной из представительных характеристик, которая определяет процессы в фурменной зоне, является теоретическая температура горения топлива у фурм (T_f), вычисляемая по количеству теплоты, образующейся у фурм при неполном (до CO и H₂) горения кокса и компонентов комбинированного дутья в полученном объеме горнового газа. Рассмотрение данной характеристики актуально для случая получения феррофосфора с РЗМ. Для расчета теоретической температуры горения использовалась формула А.Н. Рамма [18.186].

В дополнение к этой методике при использовании высокозольного кокса в расходной части теплового баланса необходимо учитывать расплавление золы кокса и тепло на ее нагрев [18.198].

Таблица 18.22

**Сравнительные показатели выплавки феррофосфора
в доменной печи**

Показатели плавки	Базовый вариант	Расчетный вариант
Содержание фосфора в фосфорной руде, %	25,78	26,58
Расход, кг/т чугуна		
- Томторская руда	-	1453
- Фосфорная руда	1481	1453
- кварцит	-	726
- кокс	1140	1132
Расход топливной добавки к дутью, в том числе:		
- пылеугольное топливо, кг/т чугуна	-	300
- коксовый газ, м ³ /т чугуна	-	50
Выход шлака, кг/т чугуна	1242	1981
Основность шлака (CaO/SiO ₂)	1,43	1,18
Температура дутья, °C	860	1800 ^{*)}
Теоретическая температура горения топлива у фурм, °C	2034	2463
Состав чугуна, %:		
P	15,97	29,56
Ce	-	8,87
La	-	9,23
S	0,028	0,062 ^{**)}
Степень использования восстановительной способности газа, %	8,32	18,15
КПД тепла, %	74,16	85,70
Коэффициент использования тепловой энергии углерода, %	30,64	36,67
Константа десульфурации K _{ce,s}	-	2,87
Колошниковый газ, %		
CO		
CO ₂	3,4	
^{*)} С использованием плазменного нагрева		
^{**) Требуется внедоменная десульфация}		

Таблица 18.23

Параметры чугуна, содержащего оксиды РЗМ,
рассчитанные по методике Рамма-Похвиснева

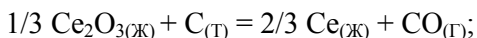
Показатели плавки	Базовый вариант (Кузнецкий металлургический комбинат)	Расчетный вариант № 1 (Томторская руда)	Расчетный вариант № 2 (Чуктуконская руда)
Содержание РЗМ в руде, %	-	29,90	5,42
Расход, кг/т чугуна			
- Томторская руда	-	934	-
- Чуктуконская руда	-	-	1028
- Абагурский агломерат	818	-	-
- Мундебашский агломерат	818	-	-
- металлизированные окатыши	-	467	474
- кокс	519	398	225
- флюс	3	269	248
- пылеугольное топливо	-	300	300
Содержание железа в шихте	56,69	41,25	54,05
Выход шлака, кг/т чугуна	327	454	409
Основность шлака (CaO/SiO_2)	1,21	1,08	1,17
Температура дутья, °С	1019	2000	2000
Теоретическая температура горения топлива у фурм, °С	2034	2412	2420
Состав чугуна, %:			
Ce	-	9,13	1,13
La	-	9,50	1,19
Окончание таблицы 18.23			
S	0,013	0,034	0,016
P	0,157	8,15	0,10
Mn	0,497	0,17	5,02
Степень использования восстановительной способности газа, %	44,20	20,40	31,80
КПД по использованию теплоты, %	86,04	87,50	89,60
Коэффициент использования тепловой энергии углерода, %	60,79	36,00	42,18

Как видим, использование Томторской руды, содержащей оксиды редкоземельных металлов, обеспечивает получение чугуна с

18 % РЗМ, который в дальнейшем может применяться в качестве лигатуры, а также для производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. При этом, дополнительное введение в шихту металлизированных окатышей, позволяет удерживать содержание железа в шихте на среднем уровне по сравнению с базовым (снижение составило в среднем 9,04 %). Экономия кокса с увеличением степени металлизации шихты $\eta_{\text{мет}}^*$ с 44 до 58 % составила в среднем 190 кг/т чугуна, при этом выход шлака составил в случае Томторской руды 454 кг/т чугуна.

Использование дутья, нагретого до 2000 °С, с помощью низкотемпературной плазмы позволяет уменьшить расход кокса, поддерживать высокую теоретическую температуру горения топлива у фурм, достигать высокого КПД по использованию теплоты в нижней зоне доменной печи, осуществлять плавное регулирование режима плавки в случае применения пылеугольного топлива с высоким содержанием летучих. Обеспечение высокой температуры в горне увеличивает степень перехода РЗМ в чугун и способствует его лучшей десульфурации.

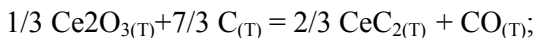
Реакция восстановления оксида церия может быть представлена в виде:



$$\Delta G_{\text{Ce}(\text{ж})}^0 = 461191 - 174,604 \cdot T \quad \text{Дж/моль.} \quad (18.248)$$

На основании термодинамического расчета установлено, что с повышением температуры равновесное содержание церия возрастает, а активное восстановление оксида церия углеродом начинается при температуре 1900 °С, при этом содержание церия в металле достигает значения 1 % (см. рис. 18.72).

Было выявлено, что восстановление оксида церия твердым углеродом более интенсивно протекает через образование промежуточных соединений (карбидов, силицидов, нитридов и др.), например,



$$\Delta G_{\text{CeC}_{2(\text{т})}}^0 = 432285 - 206,814 \cdot T \quad \text{Дж/моль.} \quad (18.249)$$

* Степень металлизации $\eta_{\text{мет}} = (\text{Fe}_{\text{мет}} / \text{Fe}_{\text{общ}}) 100 \%$.

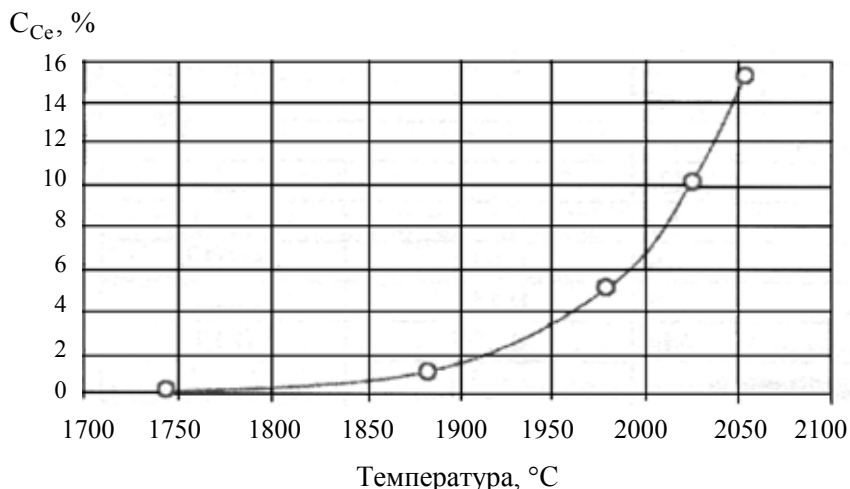


Рис. 18.72. Термодинамическая зависимость равновесного содержания церия в чугунах C_{Ce} от температуры

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Применение плазменных технологий дает высокий нагрев дутья, низкий расход кокса и обеспечивает необходимый приток тепла в нижнюю часть доменной печи, особенно с учетом, например, содержания большого количества летучих в применяемом пылеугольном топливе.

Использование в качестве шихты Томторской руды Якутского месторождения и фосфорной руды бассейна Каратау, содержащих значительное количество оксидов фосфора, позволит получить высокофосфористый чугун (до 30 % Р), а в случае Томторской руды получить чугун с содержанием редкоземельных металлов (Ce + La) до 18 %.

При выплавке феррофосфора с РЗМ в плазменной доменной печи необходимо учитывать изменение теоретической температуры горения топлива у фурм. Повышение теоретической температуры горения обеспечивает эффективный переход РЗМ в чугун и получение высокого содержания фосфора при плазменном нагреве.

Термодинамический анализ показал, что процесс восстановления оксида церия твердым углеродом до жидкого церия, проходит менее интенсивно, чем процесс образования твердого карбида церия.

18.5.11. Экспертная тестовая система оценки персонала – специалистов доменного производства

Данная работа под руководством В. Г. Лисиенко выполнялась А.В. Сучковым с участием В.А. Сучкова [18.37; 18.166; 18.194].

Доменное производство требует постоянного обучения и контроля знаний и навыков персонала, который непосредственно влияет на работу печи, в частности мастеров. Часто именно этот персонал принимает ключевые решения, влияющие на протекание производственных процессов и состояние оборудования. Поэтому задача постоянной оценки профессионализма работников доменных печей является актуальной.

Рассмотрим кратко общие подходы, которые могут быть использованы для оценки персонала.

Можно использовать наблюдения за реальной работой специалиста, анализируя их. Именно так обычно оцениваются производственные работники своими руководителями. Такой способ оценки знаний далеко не совершенен по причине возможных временных, технологических проблем и сложности оценки поведения человека в критических и других редких, но важных ситуациях.

Может использоваться непосредственный контакт проверяемого и проверяющего, например - экзамен, беседа. Этот путь может использоваться, но негативными его сторонами является зависимость от отдельных людей и обстоятельств, а также сложность организации (приглашения экспертов).

Наконец, оценка компетентности мастера может быть организована в виде формальных заданий, предлагаемых мастеру, которые выявляли бы знания мастера и достаточно легко подвергались бы обработке, т. е. тестов. Конечно, тестовая форма контроля может иметь недостатки, такие как излишний формализм и ограниченность, однако качественная реализация теста позволяет минимизировать эти недостатки. Зато тест обладает неоспоримыми преимуществами, такими как беспристрастность, относительная быстрота проведения, четкость оценок, широкий охват материала для проверки.

Очевидно, что сегодня тестирование целесообразно проводить с использованием компьютеров. Для этой цели необходимо сформировать качественный набор тестовых заданий.

Отметим проблемы, которые составляют специфику тестирования работников производства. Во-первых, знания разработчика тестовой системы в области доменного производства являются недостаточными. Подобная проблема является не следствием недостаточной образованности, а спецификой решаемой задачи, которая лежит на стыке нескольких научных и прикладных дисциплин, что обуславливает невозможность качественного решения проблемы силами одного человека.

В данном случае для реализации компьютерной системы тестирования необходимо привлечение экспертов доменного производства, которые должны:

- указать, по каким темам должно проводиться тестирование;
- сформировать базу тестовых заданий, где каждое задание должно соответствовать одному из четырех типов (открытого типа, с выбором ответа, на порядок, на соответствие);
- оценить важность всех разделов и заданий с помощью балльной шкалы, ранжирования, либо попарного сравнения (за основу в работе взят первый вариант).

Работа экспертов «с чистого листа» была бы очень трудоемкой, поэтому для анализа экспертам предлагается предварительный выбор тем, по которым предполагается проводить тестирование, представленный в виде иерархии (4 уровня). Для полноты и объективности теста экспертов должно быть несколько, и они должны представлять, по возможности, различные направления рассматриваемой науки (например, теоретик, практик). Работа экспертов «с чистого листа» была бы очень трудоемкой, поэтому для анализа экспертам предлагается предварительный набор тем, по которым предполагается проводить тестирование, представленный в виде иерархии. Для составления этой иерархии на основе положений системного анализа и был разработан общий подход, который может быть использован при создании тестов для различных специалистов производства (см. рис. 18.73).

Первый уровень представляет собой декомпозицию главной цели тестирования по видам профессиональной деятельности специалиста. Для инженерных специальностей можно выделить следующие виды такой деятельности:

- производственно-технологическая;

- эксплуатационная и сервисного обслуживания;
- научно-исследовательская;
- проектно-конструкторская;
- организационно-управленческая.

В случае оценки технического персонала доменной печи используется лишь производственно-технологическая деятельность.

На втором уровне было целесообразно подцели второго уровня разбить. К ним, в частности относятся:

- основные технологические процессы;
- вспомогательные технологические процессы;
- основное оборудование и устройства;
- моделирование процессов;
- материалы и компоненты;
- системы контроля и управления процессами;
- методы исследования и диагностики процессов и оборудования;
- обеспечение энерго- и ресурсосбережения;
- защита окружающей среды;
- обеспечение качества выпускаемой продукции;
- другие объекты деятельности.

На третьем уровне для каждого объекта профессиональной деятельности формируется соответствующий набор компонентов (решаемых задач) и формируется по две подцели:

- оценка компетентности персонала по вопросам управления соответствующим процессом;
- оценка компетентности персонала по вопросам реализации процесса.

Наконец, на четвертом уровне формируются конкретные тестовые задания, связанные с объектами и задачами профессиональной деятельности работников, как в теоретическом, так и в практическом плане.

Важной проблемой при составлении тестов для производственных специалистов - учет специфики процессов, а большая часть исследований в области тестирования посвящена оценке знаний учащихся. Отличие же специалистов в том, что оценивается не столько знание теоретического материала, сколько способность принимать правильные решения, связанные, как правило, с регулированием производственных процессов.



Рис. 18.73. Схема формирования иерархии разделов тестовых заданий в соответствии с формальными моделями

Для решения описанных проблем необходимо обеспечить высокое качество и валидность (соответствие цели) тестовых заданий, что должно обеспечиваться использованием экспертных знаний.

Описанные и некоторые другие требования к разрабатываемой тестовой системе можно сгруппировать следующим образом:

- полнота и качество набора тестовых заданий;
- удобство для тестируемого и для проверяющего;
- надежность работы, хранения результатов;
- настраиваемость, изменяемость;
- возможность работы на большинстве компьютеров;
- как можно меньшая себестоимость.

С учетом рассмотренных выше проблем можно сформулировать также требования к процессу формирования тестовой системы:

- использование экспертной информации;
- опрос нескольких различных экспертов;
- удобство работы экспертов.

Чтобы упростить решение проблем второй группы была разработана программа экспертного выбора тем тестирования, с помощью

которой эксперты отмечают важность различных тем тестирования по 4-балльной шкале (0 - данный раздел не включается в тест, 1 - низкая важность раздела, 2 - средняя, 3 - высокая).

Задания формируются экспертами на данный момент без использования компьютера, поскольку занесение заданий разных типов с вариантами ответов довольно громоздко, хотя, конечно, может быть реализовано.

Для оценки навыков по управлению процессом на четвертом уровне предлагается использовать следующие компоненты содержательной модели жизненного цикла решений:

- 1) анализ информации;
- 2) формулировка проблемной ситуации, прогнозирование развития ситуации;
- 3) формирование целей, определение критериев;
- 4) формирование множества вариантов решений, выбор наилучшего решения;
- 5) реализация выбранного решения.

Функция «Оценка компетентности персонала по вопросам реализации процесса» в общем виде может быть реализована путем использования следующих составляющих цикла осуществления процесса:

- 1) подача ингредиентов;
- 2) перемещение ингредиентов;
- 3) реализация физико-химических процессов;
- 4) контроль за протеканием этих процессов;
- 5) получение выходных продуктов, контроль качества продуктов;
- 6) вывод продуктов во внешнюю среду, использование их в последующих процессах.

При необходимости для каждого этапа цикла принятия решения и для этапов реализации технологического процесса на пятом уровне выделяются дополнительные разделы. На нижнем уровне иерархии формируются тестовые задания.

Для построения иерархии разделов, основанной на сформулированных выше теоретических положениях, и формирования тестовых заданий разработана компьютерная программа Experts Inquir. В ней предусмотрены возможности редактирования, удаления и добавления компонентов дерева, оценки их важности. Для хранения

информации используется база данных формата MS Access, которая содержит 8 таблиц. В ней содержатся наименования разделов тестирования, формулировки тестовых заданий и варианты ответов, информация о связях между различными темами и заданиями, баллы, характеризующие важность разделов, информация об экспертах. Формирование тестового задания одного из четырех типов реализовано в программе в виде диалога. В результате применения этой программы с помощью экспертов получено дерево тем, на нижнем уровне которого сформулировано 38 групп, каждая из которых включает до 10 заданий.

Для определения важности тем тестирования используется метод балльной оценки. После окончания работы экспертов находятся итоговые показатели важности тем. На основании полученных величин каждой теме и заданию ставится в соответствие определенный весовой коэффициент.

Для проведения тестирования и сохранения результатов использована известная оболочка АСТ-Тест. Она позволяет создавать задания в четырех формах, при тестировании выбирать вопросы из раздела случайным образом, надежно хранить результаты и т. д.

Отметим конкретное наполнение уровней в тестовой части, касающееся непосредственно доменной печи (см. рис. 18.73).

Глобальной целью явилось формирование необходимого множества параметров и переменных, характерных для ведения доменного процесса и управления им.

Ниже приведены группы параметров и переменных доменного процесса, сформированные применительно к основному выходному продукту – чугуну (в данном списке первая цифра – номер уровня, а не порядковый номер).

2.1. Чугун

3.1.1. Процессы теплообмена.

4.1.1.1. Вход процесса.

5.1.1.1.1. Прогнозирование течения процесса.

6.1.1.1.1.1. Температура шихты на колошнике.

6.1.1.1.1.2. Температура природного газа, угольной пыли и других видов топлива, подаваемых в горн.

6.1.1.1.1.3. Характеристики кокса.

6.1.1.1.1.4. Конструктивные параметры доменной печи.

- 5.1.1.1.2. Выбор решения по управлению.
- 6.1.1.1.2.1. Состав железорудной части шихты, содержание влаги.
- 6.1.1.1.2.2. Объем природного газа, угольной пыли и других видов топлива, подаваемых в горн.
- 6.1.1.1.2.3. Содержание влаги в дутье.
- 6.1.1.1.2.4. Содержание кислорода в дутье.
- 6.1.1.1.2.5. Температура дутья.
- 6.1.1.1.2.6. Расход дутья.
- 6.1.1.1.2.7. Количество известняка в шихте.
- 6.1.1.1.2.8. Рудная нагрузка.
- 4.1.1.2. Теплообмен в нижней зоне доменной печи.
- 5.1.1.2.1. Контроль и анализ хода процесса.
- 6.1.1.2.1.1. Состав и температура газа на границе между зонами.
- 6.1.1.2.1.2. Состав и температура шихты на границе между зонами.
- 5.1.1.2.2. Прогнозирование течения процесса.
- 6.1.1.2.2.1. Температура фурменного очага.
- 6.1.1.2.2.2. Оптимальная величина тепла, приходящего в нижнюю зону.
- 6.1.1.2.2.3. Фактический приход тепла в нижнюю зону.
- 4.1.1.3. Теплообмен в верхней зоне доменной печи.
- 5.1.1.3.1. Контроль и анализ хода процесса.
- 6.1.1.3.1.1. Количество пыли, поступающее из нижней части печи.
- 6.1.1.3.1.2. Количество пыли, уносимое колошниковым газом.
- 6.1.1.3.1.3. Состав и температура газа на границе между зонами.
- 6.1.1.3.1.4. Состав и температура шихты на границе между зонами.
- 5.1.1.3.2. Прогнозирование течения процесса.
- 6.1.1.3.2.1. Интегральная характеристика теплового состояния верхней зоны.
- 5.1.1.3.3. Выбор решения по управлению.
- 6.1.1.3.3.1. Уровень засыпи.
- 4.1.1.4. Выход процесса.
- 5.1.1.4.1. Контроль и анализ хода процесса.
- 6.1.1.4.1.1. Температура и состав чугуна.
- 6.1.1.4.1.2. Температура и состав шлака.
- 6.1.1.4.1.3. Температура и состав колошникового газа.
- 3.1.2. Процессы массообмена и химических реакций.

4.1.2.1. Вход процесса.

5.1.2.1.1. Прогнозирование течения процесса.

6.1.2.1.1.1. Конструктивные параметры доменной печи.

6.1.2.1.1.2. Характеристики кокса.

6.1.2.1.1.3. Состав природного газа, угольной пыли и других видов топлива, подаваемых в горн.

5.1.2.1.2. Выбор решения по управлению.

6.1.2.1.2.1. Состав железорудной части шихты, содержание влаги.

6.1.2.1.2.2. Объем природного газа, угольной пыли и других видов топлива, подаваемых в горн.

6.1.2.1.2.3. Рудная нагрузка.

6.1.2.1.2.4. Содержание влаги в дутье.

6.1.2.1.2.5. Содержание кислорода в дутье.

6.1.2.1.2.6. Расход дутья.

6.1.2.1.2.7. Количество известняка в шихте.

4.1.2.2. Массообмен и химические процессы в верхней зоне доменной печи.

5.1.2.2.1. Контроль и анализ хода процесса.

6.1.2.2.1.1. Количество пыли, поступающее из нижней части печи.

6.1.2.2.1.2. Количество пыли, уносимое колошниковым газом.

6.1.2.2.1.3. Состав шихты на границе между зонами.

6.1.2.2.1.4. Состав газа на границе между зонами.

5.1.2.2.2. Прогнозирование течения процесса.

6.1.2.2.2.1. Степени использования газов CO и H_2 .

6.1.2.2.2.2. Интегральная характеристика теплового состояния верхней зоны.

4.1.2.3. Массообмен и химические процессы в нижней зоне доменной печи.

5.1.2.3.1. Контроль и анализ хода процесса.

6.1.2.3.1.1. Состав шихты на границе между зонами.

6.1.2.3.1.2. Состав газа на границе между зонами.

6.1.2.3.1.3. Степень прямого восстановления.

5.1.2.3.2. Прогнозирование течения процесса.

6.1.2.3.2.1. Температура фурменного очага.

6.1.2.3.2.2. Оптимальная величина тепла, приходящего в нижнюю зону.

6.1.2.3.2.3. Фактический приход тепла в нижнюю зону.

4.1.2.4. Выход процесса.

5.1.2.4.1. Контроль и анализ хода процесса.

6.1.2.4.1.1. Состав чугуна.

6.1.2.4.1.2. Состав шлака.

6.1.2.4.1.3. Состав колошникового газа.

Необходимо отметить, что часть приведенных на нижнем уровне параметров являются обобщенными (например, состав железорудных материалов), и могут быть конкретизированы.

При анализе полученного списка величин, сформированных на нижнем уровне применительно к получению чугуна и шлака в качестве выходных продуктов, можно сделать вывод, что большая часть входных величин оказывает влияние сразу на несколько видов процессов, происходящих в доменной печи. Списки параметров и переменных, относящиеся к процессам получения всех трех выходных продуктов мало отличаются друг от друга, что также подтверждает взаимосвязанность всех процессов в доменной печи и невозможность рассмотрения процессов в доменной печи независимо друг от друга при построении модели.

Используя полученный набор величин можно оценить те или иные модели доменного процесса с точки зрения полноты набора применяемых в них параметров и переменных.

На втором уровне необходимо разбить глобальную цель с учетом конечных продуктов. Полезным продуктом является чугун, а отходами (побочными продуктами) – шлак, колошниковый газ и колошниковая пыль (последние два можно рассматривать вместе, так как разделение происходит за пределами печи). Тогда получаем три подцели:

- обеспечение производства чугуна с заданными свойствами;
- производство шлака с учетом требований экономики, нормального протекания процесса и окружающей среды;
- получение колошникового газа и колошниковой пыли с учетом требований экономики, нормального протекания процесса и окружающей среды.

На третьем уровне нужно выделить технологические процессы, протекающие в объекте и необходимые для производства конечных продуктов. В первую очередь это процесс массообмена, в результате которого из железной руды и других ингредиентов получают чугун. Отметим, что данный процесс сопровождается химическими про-

цессами окисления, восстановления и другими. Массообмен и химические процессы осуществляются при определенном распределении температур в объеме доменной печи, которое характеризует процессы теплообмена. Так как в печи происходит противоточное движение газа (снизу вверх) и шихты (сверху вниз), необходим учет соответствующих процессов динамики.

Таким образом, в доменном производстве конечные продукты получают в результате следующих основных процессов:

- массообмена и химических реакций;
- теплообмена;
- газодинамики, динамики твердых тел и расплавов.

Четвертый уровень дерева предусматривает выделение этапов реализации процесса. Для доменного производства можно выделить четыре этапа:

- 1) начало процесса;
- 2) протекание процесса в верхней части печи;
- 3) протекание процесса в нижней части печи;
- 4) конец процесса.

На пятом уровне сохраняются перечисленные этапы (контроль и анализ хода процесса, прогнозирование течения процесса, выбор решения по управлению).

Для оценки компетенции персонала была использована методика дерева целей, главной особенностью которой является использование коэффициентов влияния [18.194].

Было сформировано подробное и конкретное дерево тем теста, применительно к процессам в доменной печи с установлением баллов и весов в областях: управления; реализации доменного процесса; подачи шихты; подачи дутья; отвода и очистки колошникового газа; выпуска чугуна и шлака.

В результате реализации процедуры формирования теста с использованием программы Experts Inquiry сформировано дерево тем теста. Полученная структура его имеет следующий вид.

1. Оценка компетентности в области управления доменным процессом.

1.1. Возможные проблемные ситуации в доменном процессе.

- 1.1.1. Причины и вероятность аварий и их предотвращение.*
 - 1.1.1.1. Причины и предотвращение взрыва газозоодушных смесей.*
 - 1.1.1.2. Причины и предотвращение аварий, связанных с отказом оборудования.*
 - 1.1.1.3. Причины и предотвращение разрушения кожуха, кладки, системы охлаждения печи.*
- 1.1.2. Причины и предотвращение расстройств хоаа доменной плавки.*
 - 1.1.2.1. Причины и предотвращение нарушений устойчивости газового потока в печи.*
 - 1.1.2.2. Причины и предотвращение нарушений теплового состояния печи.*
 - 1.1.2.3. Причины и предотвращение нарушений ровного схода шихты.*
- 1.1.3. Причины неудовлетворительного состава чугуна, его нормализация.*
- 1.1.4. Причины и предотвращение повышенного расхода топлива.*
- 1.2. Прогнозирование развития ситуации для различных комбинаций данных о состоянии процесса.*
- 1.3. Цели управления каждым процессом.*
- 1.4. Набор критериев, характеризующих качество процессов, их желаемые значения.*
- 1.5. Варианты решений при различных комбинациях данных о состоянии процессов, их реализация, оценка результатов.*
- 2. Оценка компетентности по вопросам реализации доменного процесса.*
 - 2.1. Оборудование доменной печи.*
 - 2.2. Движение шихты и газов в печи.*
 - 2.3. Физико-химические процессы в доменной печи.*
 - 2.3.1. Удаление влаги шихты, разложение гидратов и карбонатов.*
 - 2.3.2. Восстановление железа и других элементов.*
 - 2.3.3. Образование чугуна и шлака.*
 - 2.3.4. Поведение серы.*
 - 2.4. Контролируемые величины доменного процесса, применяемые контрольно-измерительные приборы.*

3. *Оценка компетентности в области процесса подачи шихты.*
 - 3.1. *Состав шихты и его влияние на процессы в печи.*
 - 3.1.1. *Агломерат.*
 - 3.1.2. *Окатыши.*
 - 3.1.3. *Кокс.*
 - 3.1.4. *Флюсы.*
 - 3.1.5. *Добавки.*
 - 3.2. *Оборудование для загрузки шихтовых материалов.*
 - 3.3. *Размещение материалов на колошнике.*
 - 3.4. *Контролируемые величины процесса, применяемые контрольно-измерительные приборы.*
4. *Оценка компетентности по обеспечению подачи дутья.*
 - 4.1. *Оборудование для нагрева и подачи дутья.*
 - 4.2. *Добавки в дутье, их сочетание, влияние на процессы в печи.*
 - 4.3. *Контролируемые величины процесса, применяемые приборы контроля.*
 - 4.4. *Управление процессом подачи дутья.*
5. *Оценка компетентности по отводу и очистке колошникового газа.*
 - 5.1. *Оборудование, используемое для отвода и очистки колошникового газа.*
 - 5.2. *Состав и свойства колошникового газа.*
 - 5.3. *Подача очищенного газа для использования в других процессах.*
6. *Оценка компетентности по проблемам выпуска чугуна и шлака.*
 - 6.1. *Оборудование, используемое для обслуживания горна, выпуска и транспортировки чугуна и шлака.*
 - 6.2. *Состав и свойства чугуна.*
 - 6.3. *Состав и свойства шлака.*
 - 6.4. *Контролируемые параметры, методы и приборы контроля качества продуктов.*

На следующем этапе осуществлено составление тестовых заданий в соответствии с полученной иерархией тем.

Примеры разных типов заданий.

Задание с выбором ответа.

Наличие несливаемого жидкого чугуна в горне, находящегося ниже уровня леток, обусловлено:

- предохранением лещади;
- технической невозможностью более низкого расположения леток;
- необходимостью стабилизации температуры горна.

Задание на ввод с клавиатуры.

По формуле $V_d - V_{O_2} - V_{H_2O}$ вычисляется расход ..., поступающего в печь с дутьем.

Задание на установление последовательности.

Расположить зоны печи по возрастанию скорости движения газа через них:

- 1) нижняя часть шахты
- 2) верхняя часть шахты
- 3) горн печи

Задание на соответствие.

Соответствие вида внутренней поверхности вертикального холодильника в доменной печи и его места расположения:

- | | |
|---|-------------------|
| 1) гладкая | 1) лещадь и горн |
| 2) ребристая | 2) распар и шахта |
| 3) ребристая с залитым огнеупорным кирпичом | 3) заплечики |

В табл. 18.24 приведено распределение по темам второго уровня количества правильных ответов из общего количества заданий для каждой темы, а также средневзвешенная балльная оценка и весовой коэффициент по каждому разделу.

Интегральная средневзвешенная балльная оценка испытуемого $B = 0,81$. При этом доля правильных ответов составила 78 %, из чего можно сделать вывод, что средняя сложность заданий, на которые испытуемый дал верный ответ, выше средней сложности для всех заданий.

Наибольший балл соответственно равен 1.

Как отмечалось, был разработан и тренажер для повышения и оценки квалификации персонала доменных печей на основе математической модели [18.37].

Для динамического тренажера предполагалось два режима работы - обучение (тренировка) и тестирование (проверка знаний). При работе программы в режиме обучения имела возможность вызвать подсказку и определить дальнейшие действия. При работе в режиме тестирования подсказки не вызываются, а за каждое

неверное действие начисляются штрафные очки. Задача оценки обучаемого в описанных условиях не является тривиальной, так как в сложных динамических системах, таких как доменная печь, невозможно жестко определить последовательность правильных действий - она часто зависит от мелких деталей в развитии ситуации, к тому же возможны разные пути к достижению поставленных целей. Поэтому оценку действий обучаемого следует выводить из анализа текущего и желаемого состояния модели и проверки отдельных запрещенных действий и состояний.

Таблица 18.24

Пример результатов тестирования доменщика

Раздел второго уровня	Количество верных ответов / количество заданий	Средневзвешенная балльная оценка по каждой теме второго уровня	Весовой коэффициент раздела второго уровня
Оценка компетентности в области управления доменным процессом	9/13	0,72	0,189
Оценка компетентности по вопросам реализации доменного процесса	11/13	0,83	0,189
Оценка компетентности в области процесса подачи шихты	9/11	0,78	0,177
Оценка компетентности по обеспечению подачи дутья	8/9	0,91	0,161
Оценка компетентности по отводу и очистке колошникового газа	4/7	0,73	0,142
Оценка компетентности по проблемам выпуска чугуна и шлака	6/7	0,93	0,142

Детальное описание структуры и тематики тестовой системы приведено в [18.37].

Разработанная тестовая система была апробирована для оценки знаний студентов УрФУ и сотрудников НТМК.

В работе экспертов при консультациях А.В. Сучкова и В. Г. Лисиенко принимали участие А.Е. Пареньков, Н.А. Спирин, С.А. Загайнов и ряд других специалистов-доменщиков.

Для работников производства получены средневзвешенные оценки тем второго уровня от 0,68 до 0,8, а для студентов от 0,58 до 0,74. Средняя интегральная оценка составила, соответственно, 0,75 и 0,66. Набор сформированных тестовых заданий был представлен в Приложении к диссертационной работе А.В. Сучкова.

18.6. Управление, контроль и диагностика применительно к сталеплавильным агрегатам

В данном рассмотрении работы с участием, а часто и под руководством В. Г. Лисиенко, проведены применительно к плавильным агрегатам: сталеплавильным печам. Основными участниками этих работ были аспиранты, защитившие кандидатский диссертации под руководством автора (В.Б. Кутын, Л.Г. Груверман, А.Ю. Ташкинов, С.Н. Гущин).

18.6.1. Управление плавкой

В данной работе, проведенной на Нижне-Тагильском металлургическом комбинате с активным участием Л.Г. Грувермана при консультациях В. Г. Лисиенко и М.М. Гордона, система автоматического управления базировалась на результатах построения математической модели плавки [18.42]. При математическом моделировании использовалось уравнение множественной регрессии, определяющее длительности периода доводки плавки в виде:

$$\begin{aligned} P_d = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot BQ_H^p + \kappa_2 I_{O_2\phi} + \kappa_3 \cdot I_{O_2B} + \kappa_4 \cdot C_B + \kappa_5 \cdot t_{M.H} + \\ + \kappa_6 \cdot \delta C + \kappa_7 \cdot t_{CB} + \kappa_8 \cdot \alpha + \kappa_9 \cdot P, \end{aligned} \quad (18.250)$$

где BQ_H^p – тепловая мощность печи; $I_{O_2\phi}$ и I_{O_2B} – расходы кислорода в факел и в ванну; C_B и $t_{M.H}$ – концентрация углерода в ванне и температура металла в начале доводки; δC – скорость выгорания углерода; α и P – коэффициент расхода воздуха для горения и давление под сводом; κ_0 – κ_9 – параметры модели.

Аналогичные модели были составлены для температуры металла и температуры свода печи.

При исследовании методами математической статистики был выполнен анализ зависимостей критерия процесса доводки (Π_d) от параметров теплового и технологического режимов и от управляющих воздействий ($t_{св}$, α , P , δC , t_m , BQ_H^p , $I_{O_2ф}$, $I_{O_2в}$ для более 400 реальных плавов, проведенных с включенной системой управления «Процесс». Для анализа массив плавов разделили по маркам стали на группы, в которых параметры теплового режима ($t_{св}$, P) стабилизировались системой автоматического управления или не стабилизировались.

Для каждой группы плавов выполнен парный и множественный регрессионный анализ. Анализ проводился без отсева и с отсевом рассматриваемых параметров по уровню значимости. В результате статистической обработки получены уравнения множественной регрессии (для периода доводки) зависимости параметров процессов от управляющих воздействий, факторов теплового и технологического режима и состояние ванны.

Анализ показал, что наибольшее внимание на производительность плавки и продолжительность доводки оказывают скорость обезуглероживания, содержание углерода по расплавлению и расход кислорода в факел. Значительно слабее на длительность доводки Π_d влияют расход кислорода на продувку и коэффициент расхода воздуха. Температура свода и давление в рабочем пространстве на производительность и продолжительность доводки оказывают очень слабое влияние.

Задача управления решалась при определенных ограничениях на управляющие воздействия. Ограничения накладывались на расход топлива, кислорода, окислителей и на температуру расплава (не ниже температуры ликвидуса). Задача поиска управляющих воздействий для оптимального перевода объекта из начального состояния в конечное при известных ограничениях решалась вариационными методами.

С использованием полученных зависимостей была реализована система автоматизированного управления «Прогресс», обеспечивающая прогнозирование хода плавки, снижения расхода топлива и длительности доводки.

Отметим, что авторам в отдельных случаях приходилось обращаться к подобному роду регрессионных подходов к построению математических моделей в случаях, связанных с очень сложными многомерными технологиями. Например, это имело место в комплексной работе при поисках и определении основных факторов, влияющих на стойкость танковой брони (учитывались: нагрев металла при плавлении, жидкотекучесть металла и геометрия башни). В этом исследовании удалось установить главенствующую роль геометрии башни в обеспечении стойкости танковой башни.

18.6.2. Экспертная система управления процессом горения

Данная работа проведена В. Г. Лисиенко и В.Б. Кутыным [18.3; 18.18; 18.21].

Способы автоматического регулирования горения топлива в рабочем пространстве плавильных печей в большинстве случаев направлены на поддержание заданного коэффициента расхода воздуха а путем изменения соотношения топлива и окислителя. Иногда задание регулятору расхода вентиляторного воздуха автоматически корректируется по результатам непрерывного анализа кислорода в продуктах горения.

Во всех предложенных схемах основным воздействием на процесс горения является вентиляторный воздух. Расход интенсификаторов по периодам плавки устанавливается на основе экспериментальных наблюдений и в течение длительного времени по ходу кампании не меняется.

Как известно, горение топлива в энерготехнологических агрегатах - диффузионный процесс, определяемый, главным образом, степенью перемешивания топлива с воздухом. Следовательно, при анализе данных о составе продуктов горения, покадающих рабочее пространство печи, в случае недожога не всегда целесообразно повышать коэффициент расхода воздуха. Так, по наблюдениям авторов, на одной из сталеплавильных печей, работающей на мазуте и имеющей чрезмерно длинный факел, при $\alpha = 1,0-1,2$ в продуктах горения наряду с O_2 присутствовал оксид углерода (при содержании в пробе 3-4 % O_2 недожог составлял 9-15 %). Лишь значительное повышение расхода воздуха на горение ($\alpha > 1,4-1,5$) позволяло устранить недожог, хотя содержание кислорода при этом увеличивалось

до 7-8 %. Такое увеличение а несомненно приводит к существенно-му снижению теоретической и практической температуры горения и, как следствие, к уменьшению теплоотдачи ванне.

При турбулентном факеле одновременное присутствие в продуктах горения горючих и кислорода характеризует ухудшение процесса перемешивания топлива с воздухом (диссоциация при 1550-1650 °C сравнительно мала). Если в пробе одновременно с CO и H₂ присутствует и O₂, причем в количестве, обеспечивающем $O_2^{\text{изб}} > 0$, где $O_2^{\text{изб}} = O_2 - 0,5 (CO + H_2)$, то это свидетельствует не о недостатке воздуха для горения (при этом $\alpha > 1$), а о длинном факеле вследствие плохого перемешивания топлива и воздуха. В этом случае целесообразнее воздействовать на длину факела путем более интенсивного перемешивания. Однако все существующие схемы горения топлива не дифференцируют эти воздействия, и во всех случаях дается лишь команда на регулирование расхода воздуха, т. е. на изменение а.

Следовательно, для построения рациональной схемы регулирования горения необходимо дифференцировать имеющиеся воздействия, т. е. по наличию и соотношению в продуктах горения O₂, CO и H₂, либо только изменять коэффициент расхода воздуха α , регулируя расход вентиляторного воздуха, либо интенсифицировать перемешивание, увеличивая расход интенсификатора (кислорода или компрессорного воздуха). При данной схеме управления появляется возможность получения максимального пирометрического эффекта от сгорания топлива (максимальная теплопередача на ванну, максимальная стойкость кладки), что, очевидно, будет достигнуто, если при $\alpha \approx 1$ химический недожог q_3 будет близок к нулю.

В теплотехническом отношении постановка такой задачи ($q_3 \rightarrow 0$ при $\alpha \approx 1$) вполне оправдана.

Возможность практического осуществления такого регулирования определяется прежде всего наличием рациональной конструкции топливосжигающих устройств (форсунок, горелок) и достаточного количества интенсификатора. Последний подается или жесткими струями по бокам факела или через горелки с регулируемым расходом распылителя.

С другой стороны, осуществление предлагаемого способа регулирования горения определяется также наличием соответствующих датчиков. Для этого можно было бы использовать газоанализаторы,

однако существенным недостатком их является, кроме необходимости наличия сложной системы отбора и очистки газа, сравнительно большая инерционность. Это снижает эффективность их использования для регулирования процесса горения в таком динамичном объекте, как любая плавильная печь, где все процессы очень быстро меняются во времени.

По быстродействию наиболее привлекательны в качестве датчика температуры термохимические газоанализаторы, совмещающие катализатор с чувствительным элементом. На таком принципе работал и α -индикатор, разработанный Ю.Н. Тулуевским. Однако и этот прибор в лучшем случае может быть только индикатором недожога, так как его устройство не позволяет судить определенно об относительном содержании горючих и кислорода в продуктах горения. Кроме того, если бы даже он и фиксировал в нулевом положении оптимальное значение α , то для регулирования коэффициента расхода воздуха требуется поиск по α , чтобы вывести прибор из нулевой точки при $\alpha \approx 1$, а это, как показывает практика, приводит к разбалансу системы регулирования давления. Существенным недостатком α -индикатора является также неспособность его оценить избыток O_2 в продуктах горения.

Более полное представление о составе продуктов горения может дать усовершенствованный термохимический датчик УГТУ-УПИ (УрФУ). При включении его в схему узла регулирования горения, он позволяет осуществлять дифференциальные воздействия, указанные выше.

Конструктивно он представляет собой сдвоенные камеры дожигания (см. рис. 18.74) различных реагентов, поступающих по различным каналам для химического взаимодействия с компонентами продуктов горения. В одну камеру поступает окислитель, во вторую – горючий газ (например, природный).

Отдельные камеры дожигания, использующие в качестве реагентов воздух или горючий газ, работают так, что при всех показаниях вторичных приборов невозможно получить определенные сведения о составе продуктов горения. Однако, сопоставляя работу двух камер возможно устранение этих неопределенностей. Вероятно использование и современных быстродействующих газоанализаторов на O_2 и CO .

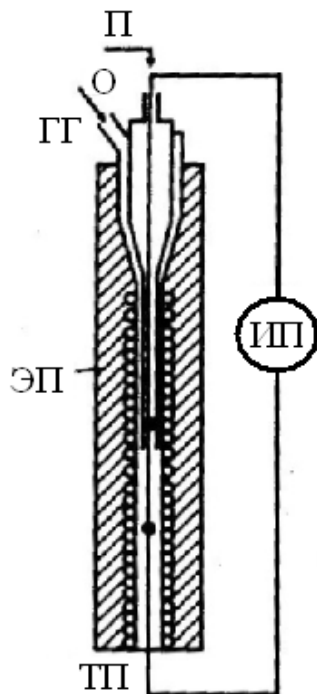


Рис. 18.74. Принципиальная схема термохимического датчика α -индикатора:

ПГ – продукты горения;

О – окислитель;

ГГ – горючий газ;

ТП – дифференциальная платино-хромелевая термопара;

ЭП – электрическая печь;

ИП – измерительный прибор

Как видно из табл. 18.25, совместная работа двух камер дожигания при анализе одной и той же пробы может выделять все характерные групповые составы продуктов горения. Сигналы, соответствующие составу продуктов горения, могут быть скомпонованы в восемь сочетаний. При этом задание регулятору будет такое, когда вырабатываемые сигналы от обеих дифференциальных термопар датчика будут равны нулю (т. е. информация «0 - 0»), чему соответствует горение топлива при коэффициенте $\alpha \approx 1$ с почти полным отсутствием химического недожога.

В общем случае в табл. 18.25 представлены возможные ситуации, отражающие характерные признаки процесса горения как по коэффициенту расхода воздуха, так и по длине факела. Эта таблица может быть использована для экспертного управления процессом горения в режиме советчика. Однако возможна и работа в режиме автоматического управления. В этом случае информация о составе продуктов горения фиксируется вторичными приборами и поступает

Таблица 18.25

Характеристика состава продуктов горения для экспертного управления и сигналы двоечного термохимического датчика

Характеристика состава продуктов горения (информация, поступающая в решающее устройство)	α	Оценка длины факела и причина, вызывающая отклонение от нормальной длины	Необходимое воздействие на процесс горения	Сигналы от камер, использующих в дожигателе	
				окислитель	горючий газ
Одновременное содержание горючих и O_2 в стехиометрическом соотношении или вблизи него	≈ 1	Факел длинный вследствие плохого перемешивания	Увеличение расхода интенсификатора	+	+
Одновременное содержание горючих и O_2 со значительным преобладанием O_2	> 1			+	-
Одновременное содержание горючих и O_2 с определенным избытком O_2	> 1			+	0
Одновременное содержание горючих и O_2 со значительным преобладанием горючих	< 1	Факел длинный из-за недостатка воздуха для горения	Увеличение расхода вентиляторного воздуха	-	+
Наличие только горючих	< 1			-	0
Одновременное содержание горючих и O_2 с определенным избытком горючих	< 1			0	+
Наличие только O_2	> 1	Факел нормальный, но расход воздуха больше необходимого для горения	Снижение расхода интенсификатора и вентиляторного воздуха	0	-
Отсутствие горючих и O_2	≈ 1	Факел нормальный	Воздействия нет	0	0

Условные обозначения: + – стабилизация горения преимущественно на верхнем спале термопары; – — то же, на нижнем спале термопары; 0 – равноценная стабилизация горения на верхнем и нижнем спалах термопары или отсутствие горения

в решающее устройство системы автоматического регулирования горения. Последнее в зависимости от характера поступившей информации выбирает соответствующее воздействие и посылает сигнал на регулятор соотношения топливо-вентиляторный воздух или на регулятор соотношения, например, топливо-компрессорный воздух, подаваемый для интенсификации, или топливо-кислород.

18.6.3. Акустический способ температурной диагностики расплавов

Разработка, дальнейшие испытания и внедрение данного способа проводились О.Э. Шликом с участием и в ряде случаев под руководством В. Г. Лисиенко, а также П.А. Нещерета и ряда других коллег [18.201; 18.202; 18.203].

Исходные разработки и их результаты

Этот способ измерения температуры жидкостей основан на измерении скорости распространения звуковой волны в контролируемой среде.

При этом звуковое возмущение формируют струйной подачей газа постоянного состава с температурой, не превышающей температуру жидкости, и измеряют частоту звука максимальной интенсивности, сопровождающего процесс воздействия струи с жидкостью и химической реакции, а затем определяют температуру жидкости по приведенной зависимости:

$$T_{\text{ж}} = \frac{(fLI)^2}{\kappa R}, \quad (18.251)$$

где f – измеренная частота звука; L – длина волны звукового возмущения при истечении в жидкость с равной температурой; κ – показатель адиабаты среды, по которой распространяется волна; R – газовая постоянная среды, по которой распространяется волна; I – приращение длины волны возмущения от температуры окружающей струю жидкости.

Формирование звукового возмущения струйной подачей газа и определение температуры по зависимости (18.251) позволяет в реальном масштабе времени непрерывно, например, по ходу конвертерной плавки контролировать температуру расплава. Опыт применения предлагаемого способа на конвертерах садкой 160 т

(представлен ниже) показал возможность подбора оптимального дутьевого режима, обеспечивающего до 20 % снижения суммарного расхода кислорода на плавку. Это мероприятие приводит к повышению качества стали, а также к снижению расхода раскислителей, что в совокупности обеспечивает снижение энергозатрат. Непрерывный контроль этого параметра исключает необходимость осуществления промежуточных измерений температуры с остановкой технологического процесса, что сокращает цикл плавки, потери энергозатрат и повышает производительность агрегата.

Способ осуществляется следующим образом. В агрегат, температуру жидкой среды которого необходимо измерить, вводят продувочное устройство (фурма или просто сопло). Через эти устройства непрерывно, если необходимо знать температуру жидкости по ходу процесса, или кратковременно, для получения информации в данный момент времени, в жидкость осуществляют струйную подачу газа, как реагирующего, так и нереагирующего с ней. При взаимодействии с жидкостью струя нереагирующего и реагирующего газа генерирует возмущения в жидкость, являющуюся генератором и передающей средой, информацию о температуре жидкости. Прием возмущений осуществляют путем снятия амплитудно-частотных характеристик шума, микрофоном или пьезодатчиком с корпуса агрегата и по полученной частоте определяют температуру жидкости.

Для этого определяют температуру фронта реакции (горения), окружающего в процессе реагирования струи с окружающим пространством (T_p):

$$T_p = \frac{T_r}{4,067 \cdot 10^{-5} \cdot \exp Mn + 0,0974}, \quad (18.252)$$

где n – степень нерасчетности; M – число Маха; T_p – абсолютная температура торможения перед соплом истекающего газа.

Затем определяется относительная температура

$$\Theta = \frac{T_r}{T_{вн}}, \quad (18.253)$$

где $T_{вн}$ – температура окружающей среды, по которой распространяется возмущение, оказывая воздействие на поток, в котором формируется длина волны возмущения. Для реагирующих струй $T_{вн} = T_p$.

Приращение длины волны l в зависимости от величины Θ определяется из следующей зависимости:

$$l = \frac{l^2}{\Theta^2} + 0,94. \quad (18.254)$$

После чего температура жидкости может быть оценена по формуле (18.251).

Таким образом, непрерывная бесконтактная диагностика температуры при истечении сверхзвуковых струй может проводиться с помощью измерения частоты основного дискретного тона акустического излучения [18.204]. При этом используется микрофон и частотный спектрометр, а температура при использовании в качестве источника звуковых колебаний сопла Лаваля определяется из уравнения

$$f = \frac{\sqrt{\kappa R T}}{2(1,05 \cdot \sqrt{n} - 1) \cdot d_a \sqrt{\kappa(M_a^2 - 1)}}, \quad (18.255)$$

где T – температура, К; f – частота основного дискретного тона; κ и R – показатель адиабаты и газовая постоянная; d_a – диаметр выходного сечения сопла; n – показатель нерасчетности струи; M_a – число Маха на выходе из сопла.

Для контроля температуры жидкости по предложенному способу проведены как лабораторные исследования – измерения амплитудно-частотных характеристик нереагирующих струй, истекающих в высокотемпературную полость печи, так и в полость металлургического агрегата – конвертер после слива стали температуры 1620 °С, а также для реагирующих струй окислителя, истекающих в расплав (топливо) в процессе конвертерной плавки.

Проверка предлагаемого способа производилась на работающем конвертере завода «Азовсталь» садкой 160 т, следующим образом: к микрофонной системе, предназначенной для определения уровня шлака в процессе плавки, подключали анализатор спектра СК 4-58, который в автоматическом режиме производил анализ шума плавки с фиксированием результата анализа на диаграммную ленту быстродействующего самописца. Аналогично плавкам с повалками проводился съем информации с цеховой ЭАМ о времени продувки, расходе кислорода, положении фурмы относительно уровня спокой-

ной ванны. В дальнейшем данные сопоставлялись и из полученных спектров выделялась частота максимальной интенсивности.

В качестве дутьевого устройства использовалась 5-ти сопловая фурма с критическим диаметром сопел $d_{кр} = 0,028$ м, выходным диаметром $d_a = 0,034$ м, с двойным углом поворота сопел относительно оси фурмы $Z = 15^\circ$, и относительно оси сопла $Z = 15^\circ$. В связи с наличием такой конструкции дутьевого устройства и деформацией выходного сечения диаметр его определялся как эквивалентный, а число Маха сопла $M = 1,8$.

В соответствии с технологической инструкцией, плавка на этих дутьевых устройствах велась с расходом O_2 $G = 350-360$ м³/мин. Такая работа продувочного устройства, как показал эксперимент, не обеспечивает получение надежного акустического сигнала, особенно в период интенсивного шлакообразования. С целью получения более надежного сигнала об изменении частоты в процессе плавки, а также возможности интенсификации процесса за счет увеличения амплитуды колебаний струи, часть времени дутья в период интенсивного шлакообразования вели на режиме с $G = 290-280$ м³/мин. Полученные результаты обрабатывались по предложенному способу.

Результаты показали достаточно хорошее совпадение рассчитываемых температур с измеренной погружной термопарой, как на промежуточных повалках, так и в конце плавки. Тенденция изменения температуры расплава соответствовала имеющимся литературным данным.

По мнению [18.201; 18.202], этот метод может применяться при высокотемпературных измерениях в различных технологиях: металлургии, химии и т. д.

О.Э. Шликом для продвижения данного метода диагностики уже в Израиле была основана фирма Accusteel – Systems и было предложено использовать акустическую диагностику не только на конвертерах, но и на электродуговых сталеплавильных печах (см. рис. 18.75) [18.203].

По данным О.Э. Шлика, после соответствующей настройки по диаграмме частоты звука можно оценивать и содержание углерода в металле по ходу плавки (корреляция 0,95–0,97). При этом прогнозируется увеличение производительности, снижение расхода энергии, увеличение выхода годного, экономия ферросплавов и раскислителей. Разработки были успешно протестированы на предприятиях Израиля, Европы и Бразилии.

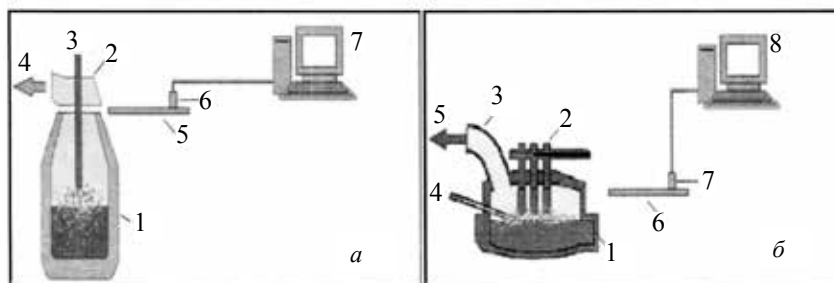


Рис. 18.75. Схемы акустической диагностики на конвертере (а) и электродуговых печах (б) по О.Э. Шлику:

а – 1 – конвертер; 2 – отводящий тракт; 3 – кислород; 4 – отходящие газы (CO , H_2); 5 – волновод; 6 – микрофон; 7 – компьютер; б – 1 – электродуговая печь; 2 – электроды; 3 – отводящий тракт; 4 – подача кислорода; 5 – отвод газов (CO , H_2); 6 – волновод; 7 – микрофон; 8 – компьютер

Испытания на сталеплавильном конвертере

В 2011 г. акустическая система контроля была испытана на одном из сталеплавильных конвертеров Нижне-Тагильского металлургического комбината. Руководителем работы был Я.С. Абаев, с участием В. Г. Лисиенко, А.Б. Богданова и др.)* Данное исследование впервые было реализовано в России. Как это выяснилось, в результате опытов, представленный для исследований конвертер емкостью 160-165 т имеет сложные технологии, связанные с получением конвертерного ванадиевого шлака, в том числе монопроцессом.

Кроме того, выплавляются и другие марки стали, всего более десяти.

Исполнителем совместно с Заказчиком было изготовлено и установлено на действующий конвертер оборудование, реализующее акустическую компьютерную систему (см. рис. 18.76).

Таким образом, установка включает: волновод, электронный микрофон, микрофонный усилитель, систему питания, компьютер. На компьютер установлена рабочая программа определения частоты звуковых колебаний.

* Абаев Я.С., Богданов А.Б., Лисиенко В.Г. [и др.]. Отчет по работе на научно-техническую продукцию, создаваемую по договору: «Отработка технологии конвертерной плавки с использованием акустической системы контроля и управления ходом технологического процесса выплавки стали «Accusteel». М., Нижний Тагил, 2011. – 12 с.

Проведена наладка работы системы с выводом записи акустических колебаний на дисплей компьютера в реальном времени. Было проанализировано 200 плавков с 13 различными марками стали.

Температура металла. За основу проверки гипотезы о зависимости частоты акустического сигнала от температуры металла в условиях конвертерной плавки было принято исходное программное обеспечение, в котором (для нейтральных жидкостей) температура жидкости $T_{\text{ж}}$ определялась по формуле (18.251).

Величины I и L в формуле (18.251) на данном этапе определялись по эмпирическим зависимостям, справедливым для нейтральных жидкостей.

Кроме того, использовалась формула, требующая адаптации:

$$T = a f^2 + b, \quad (18.256)$$

где a , b – коэффициенты адаптации, f – частота, T – температура.

В соответствии с указанными выражениями и проводился анализ получаемых материалов. Однако становилось ясным, что непосредственно использовать зависимость (18.251), полученную на нейтральных жидкостях и основанную на эмпирических соотношениях, напрямую не удастся. Была сделана попытка оценки данных для плавков одного сортамента. Так из имеющихся записей плавков были выделены 6 плавков одного типа сортамента, условия эксперимента в которых оставались постоянными (не подвергались воздействию побочных факторов).

В ходе анализа данных плавков была установлена четкая корреляция температуры, измеренной термопарой, и интегрированной средневзвешенной частотой звука, производимого струями кислорода в расплаве.

Полученная зависимость описывается математически с максимальной погрешностью до 5 °C (средняя погрешность – 2,5 °C) на данном наборе плавков при учете начальной температуры (без учета начальной температуры) максимальная погрешность составила 15 °C) (средняя погрешность – 8 °C). Таким образом, учет начальной температуры являлся необходимым для уменьшения погрешности определения конечной температуры.

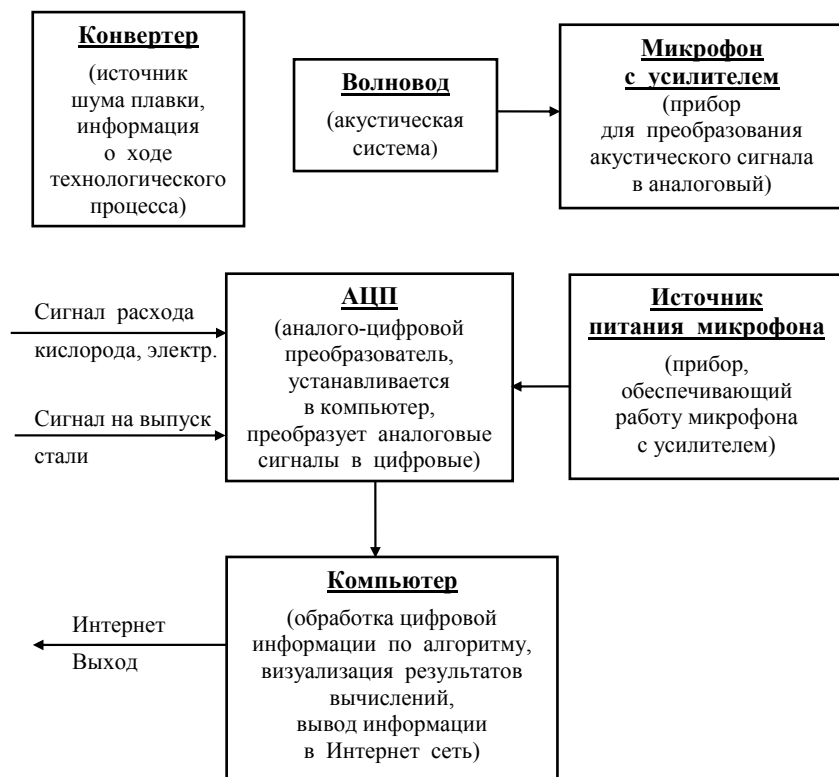


Рис. 18.76. Схема акустической компьютерной системы

В массе своей обработка данных привела к следующим выводам. В основу метода определения температуры нейтральной жидкости лежит оценка пика частоты на кривой звуковых частот.

При обработке данных применялось два метода:

1. Поиск пика частоты – на спектре выделяется частота (от 800 Гц и выше), имеющая максимальный уровень. Однако частота с ростом температуры часто не только не увеличивалась, но на некоторых плавках и уменьшалась, на некоторых – не менялась, а между плавками (с конца первой до начала второй) росла значительно больше, чем за время плавки.

2. Вычисление средневзвешенной частоты – брали участок спектра, суммировали все амплитуды частот, помноженные на их значе-

ния, потом делили на сумму амплитуд – получали математическое ожидание частоты

$$f_{\text{cp}} = \sum A(f) \cdot f / \sum A(f), \quad (18.257)$$

где f_{cp} – искомая частота, $A(f)$ – амплитуда частоты, f – текущая частота в границах f_{min} до f_{max} .

По полученным значениям температур и значениям температур, измеренным термопарами, было составлено регрессионное уравнение для нахождения коэффициентов a и b в уравнении (18.256). Граничные частоты f_{min} , f_{max} и время интегрирования подбирались путем минимизации погрешности регрессионного уравнения. Получившиеся значения равны $f_{\text{min}} = 700$ Гц, $f_{\text{max}} = 3400$ Гц, временной интервал интегрирования – 420 сек.

Однако и данная гипотеза, подтверждаясь на малом количестве плавов, на большом количестве плавов показывала неприемлемую погрешность результатов, которая составляла 40-50 °С в зависимости от набора плавов и их количества, а коэффициент корреляции рассчитываемых и определяемых температур не поднимался выше 0,22.

Зависимость скорости роста температуры от уровня шлака. Шлак в конвертере наводится на высоком положении фурмы, т. к. именно тогда жидкий металл не перемешивается (или незначительно перемешивается) струей кислорода, и происходит преимущественно окисление верхнего слоя металла. Когда углерод из верхнего слоя металла выгорает, происходит окисление железа, а также – шлакообразующих присадок, добавляемых в сталь. В процессе постепенного окисления все большего количества железа шлак поднимается, оператор опускает фурму, и поток кислорода начинает перемешивать металл более интенсивно. В этот момент начинает окисляться углерод, содержащийся в металле, за счет чего в стали образуется множество мелких пузырей CO и CO₂ (металл «вскипает»), и шлак начинает подниматься более активно. То обстоятельство, что шлак поднимается активно или находится высоко над уровнем металла, говорит о том, что процесс окисления углерода идет весьма интенсивно, а значит, скорость роста температуры значительно выше, чем при окислении самого железа.

Были сделаны следующие допущения – скорость роста температуры – величина примерно постоянная в рамках одного типа

продувки (тип продувки здесь и далее – определяется тем, что фурма открыта или закрыта шлаком), а при закрытии фурмы шлаком возрастает.

Таким образом, в анализируемых плавках было определено время закрытия фурмы шлаком и проведен корреляционный анализ между временем продувки, временем поднятия шлака и разницей температур (начальной и конечной). Был получен коэффициент корреляции, равный – 0,429. Полученное значение коэффициента не приемлемо, т. к. четко прослеживаемая зависимость отсутствует. Данные плавки были выбраны исходя из того, что проводились на одной фурме, на одном типе стали, в одинаковом процессе – моно-процесс.

Однако в ходе анализа было замечено, что существует зависимость уровня сигнала всех частот от уровня шлака. В ходе анализа данной зависимости было установлено, что частоты от 800 Гц и выше не описывают шлаковый режим достаточно точно, т. к. уровень их является чрезвычайно слабым. Частоты же до 100 Гц не рассматриваются по причине сильной зашумленности и множества резонансных процессов конструкций конвертера. Из оставшегося диапазона проанализирована область частот 600 Гц, так как в ней замечены наибольшие колебания амплитуды акустического сигнала.

Уровень шлака (реальный, в метрах) был получен следующим образом: засекался момент покрытия фурмы шлаком и записывалось положение фурмы в этот момент. После снятия нескольких контрольных точек закрытия фурмы был проведен регрессионный анализ, в ходе которого было построено регрессионное уравнение, описывающее зависимость уровня шлака от уровня акустических колебаний.

Данная зависимость была запрограммирована, а вывод оценки уровня шлака автоматизирован с помощью логических сигналов плавки и продувки.

Была найдена зависимость уровня шлака от амплитуды звука частотного диапазона 580-620 Гц. В этом диапазоне частот звук хорошо повторяет уровень шлака. Были сняты несколько контрольных точек, когда уровень шлака замерялся с помощью контроля резкого изменения качества звука при закрытии фурмы шлаком.

Уровень звука получался в условных единицах, не имеющих отношения к дБ или напряжению. Была, таким образом, получена формула связи:

$$H = 22,105 + 0,001636 \cdot \epsilon - 7,688 \cdot \log(\epsilon), \quad (18.258)$$

где H – уровень шлака в миллиметрах, ϵ – уровень звука в условных единицах, числа – найденные коэффициенты для уравнения путем регрессионного анализа трех точек. Формула показала высокую стабильность и повторяемость результатов на конвертере в ходе испытаний.

На рис. 18.77 приведены фотографии экрана для двух плавов при определении уровня шлака по уровню акустических колебаний.

На рис. 18.77, *а* изображен шлаковый режим плавки, в ходе которой шлак не поднимался до горловины котла, не было выбросов («спокойная» плавка). Примерно через 12 мин шлак закрыл фурму, и дальнейшая продувка длилась 4 мин. Данное время не является минимально необходимым (для плавов с таким поведением шлака необходимо продувать металл с погруженной в шлак фурмой примерно 5-7 мин), о чем свидетельствует додувка. С помощью данной системы оператор может визуально определить тип плавки (тип поведения шлака) и время, которое фурма находится в шлаковой пене, и не выключать продувку, если это время менее 6 мин, т. е. достаточным критерием завершения продувки приведенного типа является время продувки, когда шлак покрывал фурму.

На рис. 18.77, *б* изображен процесс плавки, при котором были объемные выбросы шлака. На уровне 7-8 мин шлак начал расти, а к 11 мин подобрался к горловине конвертера. Видно, что для уменьшения уровня шлака оператор принял решение выключить продувку (и, видимо, покачать конвертер для снижения уровня шлака), однако через 2 мин после повторного включения кислорода шлак добрался до горловины конвертера и начались объемные выбросы. Критерий завершенности плавки такого типа сформулировать не удалось. Однако достаточный критерий из плавки предыдущего типа не подошел к плавкам данного типа.

В результате работы были сделаны следующие выводы.

1. Акустическая система с программно-аппаратным комплексом была установлена на конвертере НТМК. В процессе исследований проанализировано около 200 плавов при выплавке 13 марок стали.

2. В ходе проведенного анализа и обработки плавов установлено, что при настройке параметров модели на конкретную марку стали с учетом начальной температуры оценка температуры стали может проводиться со средней погрешностью до 2,5 °С. Однако прямое использование алгоритмов оценки температуры нейтральной жидкости в зависимости от частоты звуковых колебаний на сталеплавильном конвертере затруднено и при массовой обработке плавов дает значительную погрешность при малом коэффициенте корреляции (не более 0,22).

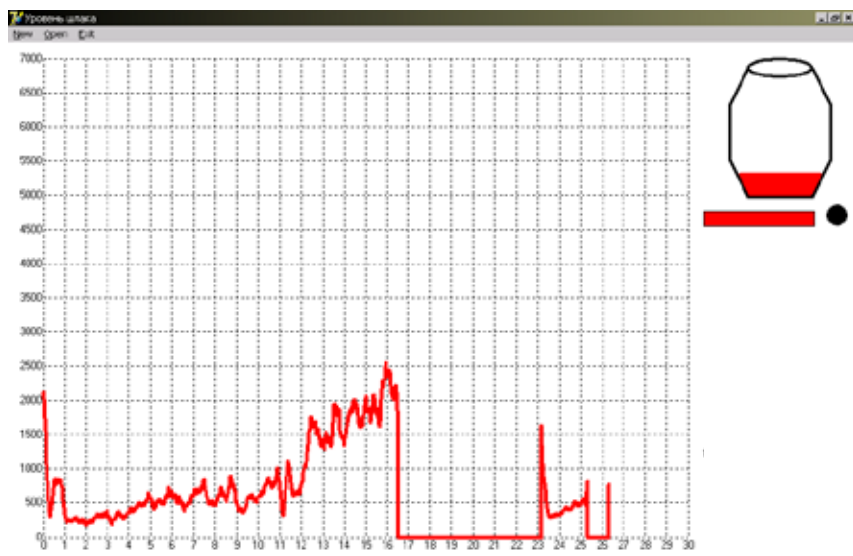
Возможные причины этого результата заключаются в следующем:

- разнообразие марок стали и технологий на конвертере НТМК, что требует уточнения применяемых алгоритмов с применением адаптации расчетных зависимостей;
- влияние шума соседних конвертеров;
- возможные локальные засорения волновода и возникновение эффекта резонанса самого волновода.

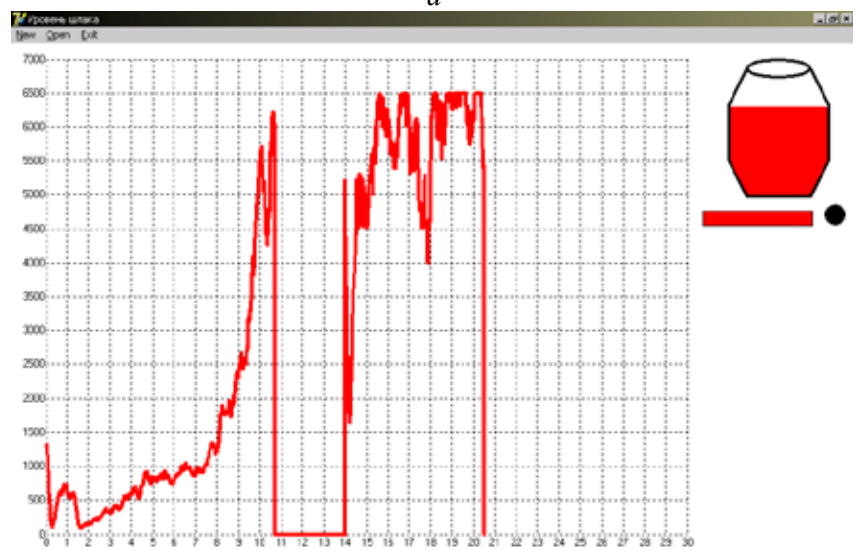
В ходе работы была обнаружена отчетливая зависимость акустического сигнала от уровня шлака, которая и была реализована в виде автоматизированного программно-аппаратного комплекса. Даная зависимость отображена как в динамике, так и в статике, наглядно, в виде шлака, заполняющего конвертер.

Был сформулирован также критерий завершения продувки для плавов «спокойного» типа – время продувки при погруженной в шлак фурме не должно быть меньше 5-6 мин.

Проведенный анализ (по ранее разработанной программе и по адаптированной зависимости), показал возможность, таким образом, достоверной информации о температуре металла на малом количестве плавов (например, на стали 09Г2С). В основном, погрешность результатов составляла 40-50 °С. Показана зависимость уровня звукового сигнала от уровня шлака, реализованная в виде автоматизированного программного аппаратного комплекса. Сформулирован критерий завершения продувки при определенном виде процесса плавки. Были намечены пути дальнейшего развития исследований и внедрения акустической системы.



a



б

Рис. 18.77. Определение уровня шлака в конвертере по ходу плавки по интенсивности звуковых колебаний:

a – спокойная плавка; *б* – плавка с выбросом шлака

Усовершенствование акустической диагностики температуры расплава

Анализ исходных формул для акустической диагностики температуры расплава и собственный с коллегами опыт применения способа на сталеплавильном конвертере показал практическую невозможность напрямую их использования в сложных условиях непосредственного ведения плавки, особенно при частых сменах сортамента выплавляемой стали.

В частности, недостатком этого способа в применении к струям, истекающим непосредственно в расплав жидкости, является неучет возможных отражений звуковых волн от поверхности жидкости и их затухания при проникновении через слой жидкости и стенки ограждающих расплав поверхностей. Кроме того, в сложных условиях взаимодействия сверхзвуковых струй с расплавом показатели нерасчетности струи и режимы сверхзвукового истечения могут изменяться, что приводит к неопределенности величин n и M_a в формуле (18.255).

В. Г. Лисиенко предложен метод и устройство, позволяющие повысить точность и надежность измерения температуры расплава в непрерывном по ходу плавки режиму функционирования [18.205].

Это устройство корректируемого непрерывного акустического определения температуры расплава включает объект, содержащий расплав и реагирующую с расплавом струю газа, истекающего из сопла, волновод звуковых колебаний, датчик частоты звуковых колебаний, спектрометр определения частоты звуковых колебаний, датчик расхода кислорода, отличается тем, что оно дополнительно снабжено блоком определения температуры расплава, контрольным датчиком температуры расплава, блоком определения настроенного температурного коэффициента при определении температуры расплава, блоком времени необходимого контроля температуры, блоком определения разницы между температурой расплава T_p и температурой контрольного датчика температуры расплава T_ϕ , $\Delta T = T_\phi - T_p$, блоком оценки величины разницы температур ΔT , при этом выход блока времени необходимого контроля температуры и выход датчика расхода кислорода соединен с контрольным датчиком температуры расплава, выходы блока определения температуры расплава и контрольного датчика температуры расплава соединены с входом блока определения разницы температур между температурой расплава и температурой контрольного датчика температу-

ры расплава, выход блока определения разницы температур между температурой расплава и температурой контрольного датчика соединен с блоком оценки величины разницы температур, выходы блока оценки величины разницы температур расплава и контрольного датчика температуры расплава соединены с входом блока определения настроечного температурного коэффициента, при этом в блоке определения настроечного температурного коэффициента определение этого коэффициента $Z_{\text{кор}}$ приводится по формуле

$$Z_{\text{кор}} = \frac{\sqrt{T_{\phi}}}{f}, \quad (18.259)$$

где T_{ϕ} – температура контрольного датчика температуры расплава; f – частота звуковых колебаний, а температура расплава в непрерывном режиме определяется по формуле

$$T = (FZ_{\text{кор}})^2. \quad (18.260)$$

Таким образом, предлагаемое устройство предусматривает использование возможностей определения температуры расплава с использованием рекомендаций [18.201], однако в нем дополнительно предусмотрено применение блоков, реализующих корректировку основных параметров расчетной зависимости (18.252) в темпе с процессом формирования расплава.

В соответствии с формулой (18.255) значение температуры T в функции частоты акустических колебаний F представлено в виде

$$T = f^2 \frac{\left[2(1,05\sqrt{n} - 0,1)d_a\sqrt{\kappa(M_a^2 - 1)}\right]^2}{\kappa R}. \quad (18.261)$$

В связи с большой неопределенностью, содержащейся в величинах второго сомножителя правой части формулы (18.261) применительно к условиям определения температуры расплава T , формула (18.261) была представлена в виде

$$T = f^2 Z_{\text{кор}}^2 = (FZ_{\text{кор}})^2, \quad (18.262)$$

где $Z_{\text{кор}}$ – настроечный температурный коэффициент для определения температуры расплава; F – частота акустических колебаний максимальной интенсивности.

При этом в качестве контрольного датчика определения температуры расплава может быть использована термопара погружения или другие способы определения температуры расплава [18.27; 18.28; 18.202; 18.206]. Однако, например, применение термопар погружения носит разовый характер и не может обеспечить непрерывность контроля температуры расплава. Поэтому в предлагаемой полезной модели использование контрольного датчика температуры расплава носит разовый эпизодический характер и предназначено для эпизодического контроля температуры расплава с целью корректировки основных эмпирических параметров, определяющей непрерывное измерение температуры расплава с использованием частоты акустических колебаний, представленных формулой (18.262). Использование контрольного датчика температуры расплава обеспечивается при наличии зафиксированного датчиком расхода фактической подачи кислорода через сопла в расплав перед проведением контрольного измерения температуры расплава.

Время контрольных замеров устанавливается операторами в зависимости от смены условий протекания процесса плавки (марка стали, состав шихтовых материалов, подача присадок в процессе плавки, процент кислорода в кислородном дутье). Сравнение показаний контрольного контактного датчика и температуры расплава, определяемой по формуле (18.262), проводится в соответствующем блоке сравнения. Возникающая при этом разница температур ΔT проходит оценку в блоке оценки этой разницы. Если величина этой разницы превосходит значение, оцениваемой классом точности K определения температуры контрольным датчиком (например, $K = 0,5$), то из блока оценки разницы температур подается команда на новую оценку настроечного температурного коэффициента Z_p , который в этом случае, в соответствии с формулой (18.262) определяется по выражению

$$Z_{\text{кор}} = \frac{\sqrt{T_{\phi}}}{F}, \quad (18.263)$$

где T_{ϕ} – температура, фиксируемая контрольным датчиком.

В дальнейшем это значение $Z_{\text{кор}}$ используется для определения температуры расплава T в непрерывном режиме по данным частоты акустических колебаний F по формуле (18.262).

Указанная корректировка температуры расплава проводится в соответствии со временем необходимого контроля температур, определяемым соответствующим блоком системы по представлению оператора.

Блок-схема данного устройства представлена на рис. 18.78.

В объекте 1 в процессе получения и обработки расплава подаваемые в расплав струи газа через сопло формируют звуковые колебания, частотой f , подаваемые через волновод 2 в микрофон и частотный спектрометр 3.

В блоке 4 с использованием частоты звуковых колебаний, определяемой датчиком частоты и частотным спектрометром, рассчитывается температура расплава по формуле (18.262).

В блоке 8 задается время определения температуры расплава с использованием контрольного датчика 6, при этом датчик расхода газа 7 подтверждает наличие подачи газа в расплав перед проведением контрольного определения температуры расплава. В блоке 9 температура расплава, определяемая в блоке 4 и температура расплава, определяемая контрольным датчиком температуры 6 сравниваются и определяется соответствующая разница температур ΔT . Эта разница оценивается в блоке 10, и в случае, если величина ΔT превышает метрологическую погрешность, определяемую классом точности контрольного датчика температуры расплава, в блоке 5 проводится определение настроечного температурного коэффициента с использованием значения температуры, определяемой контрольным датчиком по формуле (18.263).

Эта величина настроечного температурного коэффициента используется наряду с определяемой частотой акустических колебаний для непрерывной оценки температуры расплава в блоке 4 по формуле (18.262).

При необходимости дополнительного определения температуры расплава, устанавливаемой блоком 8, последовательность данного определения повторяется.

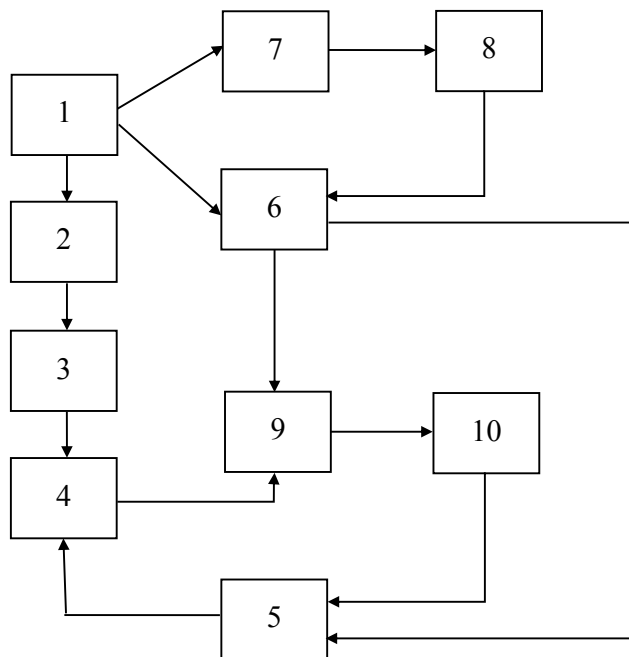


Рис. 18.78. Устройство непрерывного корректируемого акустического определения температуры расплава:

1 – объект получения и обработки расплава (например, кислородный сталеплавильный конвертер) с подачей струй, истекающего из сопла; 2 – волновод; 3 – микрофон со спектрометром; 4 – блок определения температуры расплава; 5 – блок определения настроечного температурного коэффициента; 6 – контрольный датчик температуры расплава; 7 – датчик расхода газа; 8 – блок времени необходимого контроля температуры; 9 – блок определения разницы температур между температурой расплава и температурой контрольного датчика ΔT ; 10 – блок оценки величины разницы температур ΔT

Пример реализации системы.

В кислородном конвертере 1 (рис. 18.78) осуществляется продувка кислородом чугуна для получения стали. При этом в определенный момент времени датчиком и спектрометром 3 зафиксирована частота звуковых колебаний максимальной интенсивности $F = 1000$ Гц.

В блоке 5 с использованием данных блоков 9 и 10 была оценена величина настроечного температурного коэффициента $Z_p = 0,0433$.

При этом в блоке 4 температура расплава с использованием формулы (18.262) оценена равной

$$T = (F Z_p)^2 = (1000 \cdot 0,0433)^2 = 1873 \text{ K} = 1600 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В блоках 7 и 8 при этом даны рекомендации по использованию контрольного датчика температуры расплава 6, который зафиксировал разовую температуру расплава $T_\phi = 1630 \text{ }^\circ\text{C} = 1903 \text{ K}$.

В блоке 9 с использованием данных блоков 4 и датчика 6 проведено определение разницы температур

$$\Delta T = T_\phi - T = 1630 - 1600 = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В блоке 10 эта величина ΔT сравнена с метрологической погрешностью термопары ПР 30/6 – при классе точности 0,5 и максимальной температуре (1700 °C) эта метрологическая погрешность

составит $\delta T = \frac{(1700 - 0) \cdot 0,5}{100} = 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$, что меньше определенной

разницы температур $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае величина настроечного температурного коэффициента определяется в блоке 5 по формуле (18.263)

$$Z_{\text{кор}} = \frac{\sqrt{1903}}{1000} = 0,0436.$$

Эта новая величина $Z_{\text{кор}}$ используется для скорректированного непрерывного определения температуры расплава в блоке 4.

Например, при непрерывно определяемой датчиком частоте в определенный момент времени равной $F = 980 \text{ Гц}$ скорректированная температура расплава, оцененная в блоке 4, будет по формуле (18.262) равна

$$T = (980 \cdot 0,0436)^2 = 1825 \text{ K} = 1552 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Дальнейшая корректировка величины $Z_{\text{кор}}$ проводится в соответствии с рекомендациями, вырабатываемыми в блоках 7–9 системы.

Применение системы корректируемого непрерывного акустического определения температуры расплава обеспечивает увеличение надежности и точности определения температуры расплава при изменяемых условиях протекания процессов плавки и непрерывном по ходу плавки режиме функционирования.

18.6.4. Диагностика и идентификация тепловых динамических характеристик в рабочем пространстве сталеплавильных печей

Для контроля теплового состояния рабочего пространства плавильных печей и для целей автоматического регулирования теплового режима необходимо знать характер изменения тепловых потоков в различных направлениях и точках рабочего пространства при возмущении по основным параметрам, например, тепловой нагрузке (BQ_n^p), коэффициенту расхода воздуха ($\alpha_{кл}$) и давлению под сводом ($P_{св}$) и т. д. Детальные исследования динамики тепловых потоков в рабочем пространстве плавильной печи приведены в работах А.И. Черногорова, С.Н. Гущина, авторов и соавторов [18.23; 18.42; 18.207; 18.208].

В указанных работах приведены результаты исследования характера и взаимосвязи изменений тепловых потоков, падающих на ванну, свод и стены рабочего пространства 100-т сталеплавильной печи.

Аналогичные исследования могут быть проведены на любых плавильных печах.

Синхронность изменения тепловых потоков. Тепловые потоки на ванну и кладку измерялись соответственно термозондом и радиометрами ВНИИМТа. Термозонд вводился в печь через гляделки заслонок приблизительно до продольной оси ванны. Радиометры устанавливались на своде (через два отверстия, расположенные по продольной оси на уровне крайних завалочных окон), в торце водоохлаждаемой фурмы, расположенной в кладке задней стенки на уровне первого окна на высоте примерно 450 мм от зеркала ванны, и через гляделки крайних окон (см. рис. 18.79). Показания термозонда и радиометров записывались одновременно двумя электронными быстродействующими потенциометрами в конце плавления и в период доводки при относительно стабильном тепловом состоянии печи, наступающем через 3-4 мин после перекидки клапанов.

Тепловые потоки изменяли кратковременно и скачкообразно за счет величин BQ_H^p , $\alpha_{кл}$ и $P_{св}$. Величина возмущений составляла 20-80 % от рабочего значения указанных параметров. При изменении одного из них остальные, по возможности, поддерживались постоянными.

Всего таким образом записано около двухсот пар кривых.

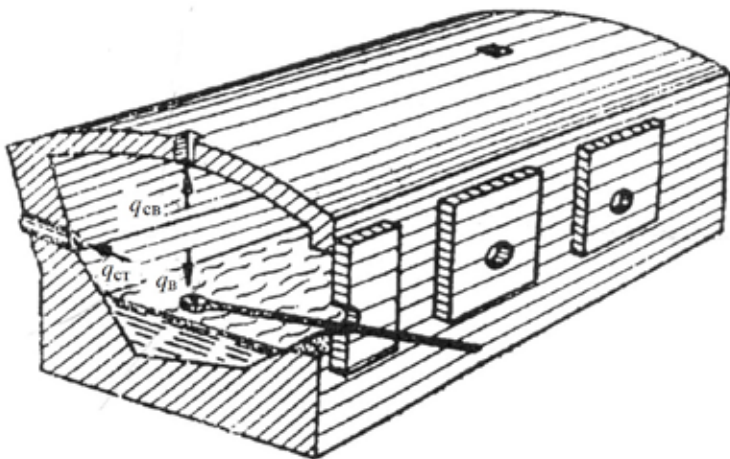


Рис. 18.79. Схема установки приборов для измерения тепловых потоков

При возмущении по тепловой нагрузке тепловые потоки на свод ($q_{св}$) и ванну ($q_{в}$) изменялись синхронно (см. рис. 18.80, а): с увеличением потока тепла на ванну одновременно возрастают тепловые потоки на свод, и наоборот. Такое же соответствие наблюдалось и в изменении тепловых потоков на свод и заднюю стенку, на свод и на переднюю стенку. Во всех случаях точки перегиба кривых приблизительно совпадали по времени, и характер кривых был приблизительно одинаков.

При возмущении по коэффициенту расхода воздуха*) тепловые потоки изменялись синхронно (см. рис. 18.80, б): с увеличением $\alpha_{кл}$ они, как правило, уменьшались, а с уменьшением $\alpha_{кл}$ возрастали. Аналогично изменялись тепловые потоки на заднюю и переднюю стенки.

* Величина $\alpha_{кл}$ изменялась в пределах от 1,01 до 1,8.

При возмущении по давлению под сводом изменение потоков тепла на ванну и кладку со стороны убирающей головки представлено на рис. 18.80, в. Несмотря на довольно резкое колебание величин давления, потоки изменялись менее заметно, чем в предыдущих случаях. Однако с увеличением $P_{\text{св}}$ тепловые потоки возрастали, а при снижении $P_{\text{св}}$ уменьшались.

Четкая зависимость в изменении тепловых потоков в начале (и в конце) рабочего пространства получена лишь при возмущении по тепловой нагрузке. С увеличением или уменьшением $\alpha_{\text{кл}}$ и $P_{\text{св}}$ изменение тепловых потоков было незначительным, а часто его вообще было трудно зафиксировать. Однако при этом во всех случаях наблюдалась синхронность в изменении тепловых потоков в различных направлениях.

Следует отметить, что при $P_{\text{св}} > 30 \text{ Н/м}^2$ приборы, установленные в начале рабочего пространства, практически не реагировали на изменение давления под сводом.

Результаты исследования указали на необходимость более тщательного наблюдения за поведением тепловых потоков в различных точках по длине печи. С этой целью проведена одновременная запись показаний двух радиометров, установленных в своде в начале и в конце рабочего пространства печи (см. рис. 18.79).

По данным исследований (см. рис. 18.80 и 18.81), возмущение по тепловой нагрузке вызывало одновременное и равнонаправленное изменение тепловых потоков на свод по длине печи. Точки перегиба кривых практически совпадали во времени. Потоки тепла на свод как в начале, так и в конце печи при данном возмущении возрастали или уменьшались примерно на одинаковую величину, зависящую от величины возмущения.

При возмущении по коэффициенту расхода воздуха и давлению под сводом тепловые потоки на свод по длине печи изменялись неодинаково. Первый радиометр, установленный вблизи убирающей головки, давал четкие показания: с ростом тепловые потоки уменьшались, а с ростом $P_{\text{св}}$ увеличивались. Второй радиометр фиксировал незначительное, но устойчивое снижение тепловых потоков при тех же изменениях $\alpha_{\text{кл}}$ и $P_{\text{св}}$. После перекидки картина менялась: показания первого радиометра практически менялась очень мало, а второй радиометр четко реагировал на все возмущения по $\alpha_{\text{кл}}$ и $P_{\text{св}}$.

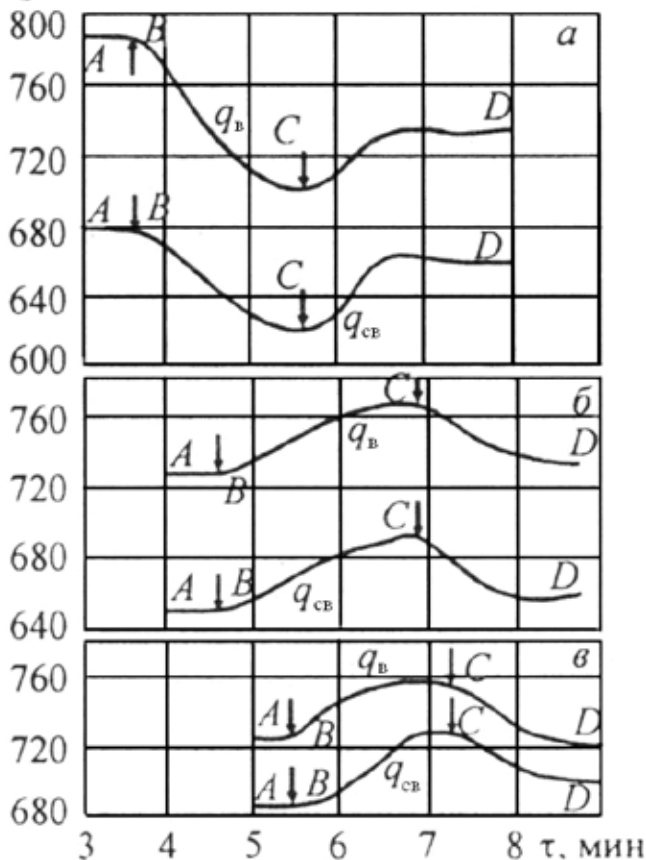
$Q, \text{кВт/м}^2$


Рис. 18.80. Изменение тепловых потоков на ванну (q_b) и свод (q_{cb}) сталеплавильной печи в конце рабочего пространства при возмущении:
 а – по тепловой нагрузке ($\alpha_{\text{кл}} = 1,48$; $P_{\text{св}} = 15,7 \text{ Н/м}^2$; $AB - BQ_{\text{H}}^{\text{P}} = 29,1 \text{ МВт}$;
 $BC - BQ_{\text{H}}^{\text{P}} = 18,8 \text{ МВт}$; $CD - BQ_{\text{H}}^{\text{P}} = 23,6 \text{ МВт}$);
 б – по коэффициенту расхода воздуха ($BQ_{\text{H}}^{\text{P}} = 25,9 \text{ МВт}$, $P_{\text{св}} = 19,6 \text{ Н/м}^2$,
 $AB - \alpha_{\text{кл}} = 1,65$, $BC - \alpha_{\text{кл}} = 1,06$, $CD - \alpha_{\text{кл}} = 1,74$); в – по давлению
 под сводом ($BQ_{\text{H}}^{\text{P}} = 20,3 \text{ МВт}$; $\alpha_{\text{кл}} = 1,49$; $AB - P_{\text{св}} = 20,6 \text{ Н/м}^2$,
 $BC - P_{\text{св}} = 35,4 \text{ Н/м}^2$, $CD - P_{\text{св}} = 22,6 \text{ Н/м}^2$)

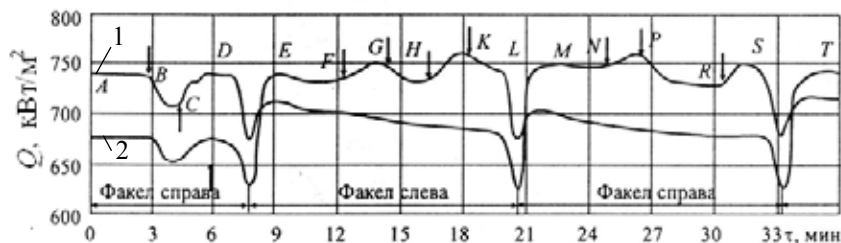


Рис. 18.81. Изменение тепловых потоков на свод сталеплавильной печи по длине рабочего пространства:

1, 2 – соответственно для правого и левого радиометра;

$$ABCDE - P_{\text{св}} = 19,6 \text{ Н/м}^2; \alpha_{\text{кл}} = 1,50; AB - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 24,5 \text{ МВт};$$

$$BC - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 20,1 \text{ МВт}; CD - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 25,0 \text{ МВт}; DE - \text{перекидка справа}$$

$$\text{налево}; EFGH - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 24,5 \text{ МВт}; P_{\text{св}} = 19,6 \text{ Н/м}^2; EF - \alpha_{\text{кл}} = 1,68;$$

$$FG - \alpha_{\text{кл}} = 1,26; GH - \alpha_{\text{кл}} = 1,57; HKLM - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 24,5 \text{ МВт}; \alpha_{\text{кл}} = 1,57;$$

$$HK - P_{\text{св}} = 29,4 \text{ Н/м}^2; KL - P_{\text{св}} = 17,6 \text{ Н/м}^2; LM - \text{перекидка слева направо};$$

$$MNPR - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 25,0 \text{ МВт}; P_{\text{св}} = 18,6 \text{ Н/м}^2; MN - \alpha_{\text{кл}} = 1,78; NP - \alpha_{\text{кл}} = 1,05;$$

$$PR - \alpha_{\text{кл}} = 1,56; PRST - BQ_{\text{Н}}^{\text{р}} = 24,5 \text{ МВт}; \alpha_{\text{кл}} = 1,56; PR - P_{\text{св}} = 18,6 \text{ Н/м}^2;$$

$$RS - P_{\text{св}} = 27,5 \text{ Н/м}^2; ST - \text{перекидка справа налево}$$

При этом тепловые потоки на свод в начале были меньше, чем в конце. То же можно сказать и о тепловых потоках на заднюю и переднюю стенку. Эта разница обычно составляла 5-11 %. А тепловые потоки на ванну в начале печи, наоборот, были на 3-8 % больше, чем в конце.

Таким образом, по величине изменения тепловых потоков, падающих на кладку, или, что то же, по температуре в данной точке рабочего пространства (если сальдо-потоки относительно невелики) можно судить о характере изменения тепловых потоков (на том же участке рабочего пространства) и на ванну при возмущении по тепловой нагрузке и относительно небольшом изменении остальных параметров теплового режима.

Обработка экспериментальных данных в форме зависимости

$$q_{\text{св}} = f(q_{\text{в}}) \text{ и } q_{\text{ст}} = f(q_{\text{св}}) \quad (18.264)$$

особенно наглядно показывает соответствие в изменении потоков теплоты, падающих на свод, ванну и заднюю стенку. Это иллюстри-

руется рис. 18.82 и 18.83. На этих графиках значения тепловых потоков представлены непосредственно в показаниях термозонда и радиометра (в МВ) без перевода этих показаний в величины тепловых потоков.

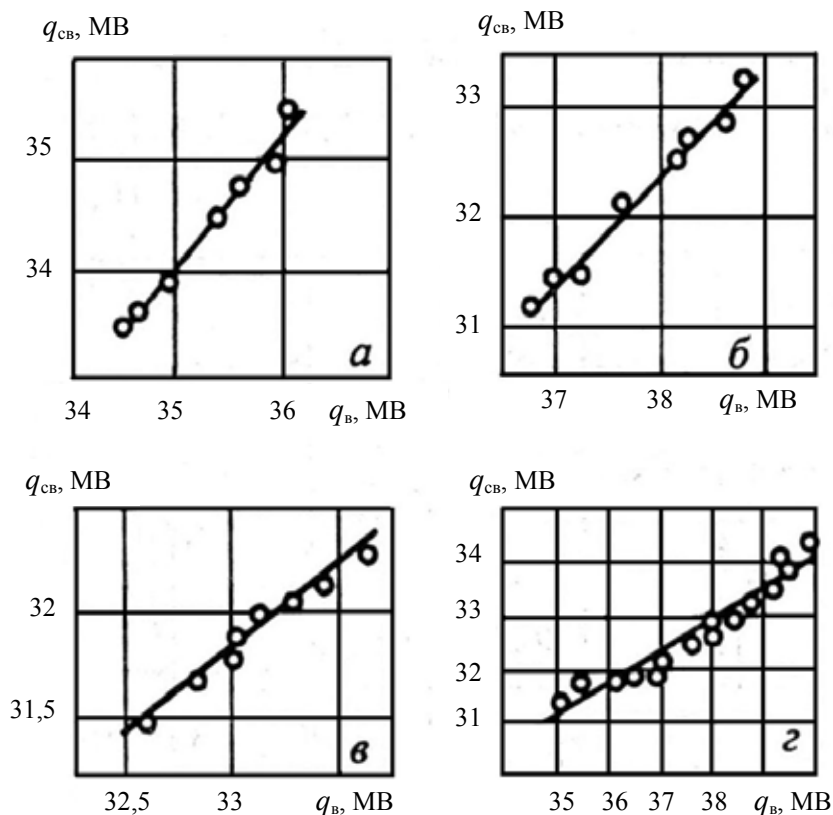


Рис. 18.82. Зависимость между тепловыми потоками на свод и ванну сталеплавильной печи: *a* – возмущение по тепловой нагрузке; *б* – возмущение по коэффициенту расхода воздуха; *в* – возмущение по давлению под сводом; *г* – перекидка клапанов

Проведенные исследования показали полное соответствие в изменении тепловых потоков на ванну и кладку как в начале, так и в конце рабочего пространства.

Аналогично проявляют себя и внешние возмущения – подача руды, открытие окон, перекидка клапанов. В этих случаях, как и при

изменении BQ_H^p , не очень важно, в какой точке рабочего пространства будет выбрано место установки прибора, фиксирующего характер изменения тепловых потоков при этих возмущениях. Иначе говоря, при этих возмущениях тепловые потоки во всех изученных направлениях и точках рабочего пространства изменялись синхронно.

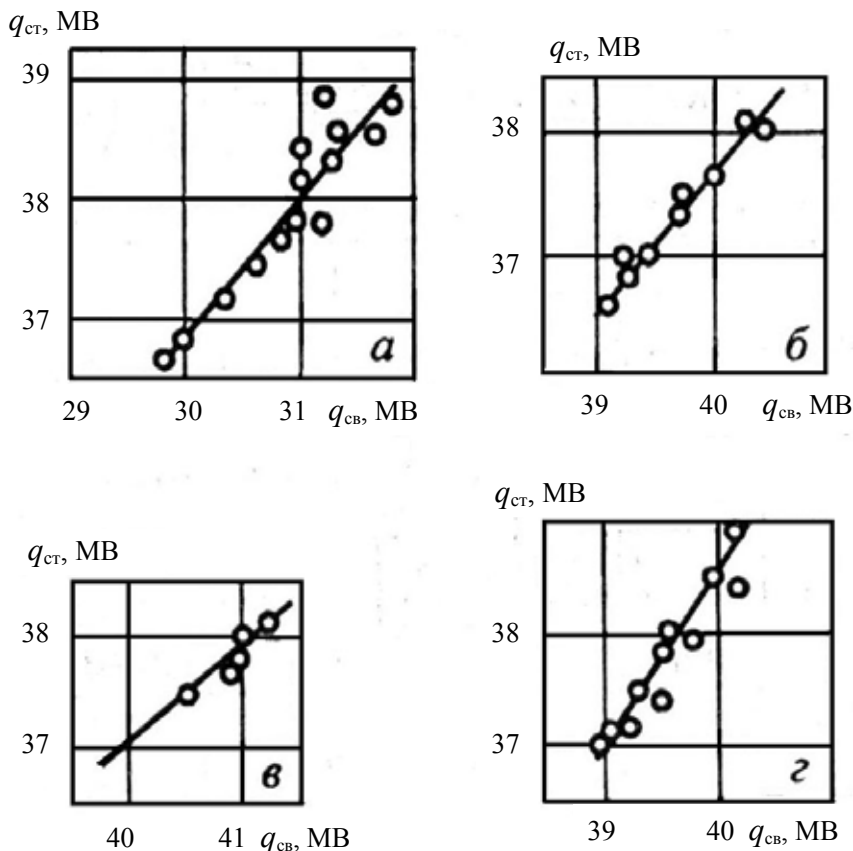


Рис. 18.83. Зависимость между тепловыми потоками на свод и заднюю стенку сталеплавильной печи: *a* – возмущение по тепловой нагрузке; *б* – возмущение по коэффициенту расхода воздуха; *в* – возмущение по давлению под сводом; *з* – перекидка клапанов

При изменении $\alpha_{кл}$ и $P_{св}$ не безразлично, в каком месте рабочего пространства установлен прибор, фиксирующий тепловые потоки,

так как на противоположных концах рабочего пространства они могут изменяться даже в разных направлениях. Вследствие этого, если иметь в виду возможность оптимизации теплопоглощения по изменению $\alpha_{\text{кл}}$, то прежде всего нужно доказать, что точка, принятая за импульсную, является достаточно представительной, а это требует дополнительных и довольно сложных исследований по изучению сальдо-потоков.

Таким образом, следствием этих соотношений является существование линейной связи между теплопоглощением ванны и полусферическими потоками тепла на свод и стенки рабочего пространства.

Было основание полагать, что аналогичная связь существует и между теплопоглощением ванны в целом $Q_{\text{м}}$ и общим потоком тепла на свод $Q_{\text{св}}$:

$$Q_{\text{м}} = A + BQ_{\text{св}}, \quad (18.265)$$

где A и B – коэффициенты, постоянные для отдельных периодов плавки.

Связи, установленные при различных изменениях параметров теплового режима и других условий теплообмена, указывают на принципиальную возможность контролировать относительное изменение теплопоглощения ванной по количеству тепла, излучаемого на свод, и использовать величину $Q_{\text{св}}$ как импульс для оптимизации отдельных параметров теплового режима. Особенно удобно это осуществить в отношении тех параметров, зависимость теплопередачи от которых, имеет экстремальный характер. Оптимальное значение какого-либо из параметров может быть определено из условия

$$\frac{\partial Q_{\text{св}}}{\partial P_i} = 0, \quad (18.266)$$

где P_i – величина i -го параметра.

Определение оптимального значения параметра из условий (18.266) осуществимо и при более слабом требовании, чем наличие линейной связи, показываемой равенством (18.265). Для этого достаточно, чтобы в окрестности оптимального значения контролируемого параметра при мгновенных его изменениях выполнялось условие

$$\frac{\partial Q_{\text{св}}}{\partial P_i} < 0 \text{ при } \frac{\partial Q_{\text{м}}}{\partial P_i} > 0; \quad \frac{\partial Q_{\text{св}}}{\partial P_i} > 0 \text{ при } \frac{\partial Q_{\text{м}}}{\partial P_i} < 0. \quad (18.267)$$

Поскольку полное количество тепла, излучаемого на свод, определить затруднительно, то вместо условия (18.266) можно воспользоваться приближенным равенством

$$\frac{\partial q_{\text{св}}}{\partial P_i} = 0, \quad (18.268)$$

где $q_{\text{св}}$ – среднее значение удельного потока на свод.

Идентификация статистических и динамических характеристик тепловых потоков. Динамические свойства рабочего пространства сталеплавильной печи определялись как кривые разгона при «быстром» изменении тепловых потоков в функции тепловой нагрузки $BQ_{\text{н}}^{\text{p}}$, коэффициента расхода воздуха на клапане $\alpha_{\text{кл}}$ и давления под сводом $P_{\text{св}}$.

Изменения входных величин регистрировались по приборам на тепловом щите печи. Кривые разгона строили по данным, полученным с помощью термозонда и радиометра ВНИИМТ, показания которых записывались электронным потенциометром. При обработке использовались результаты опытов, в которых величина вносимого возмущения не превышала 30 % от его начального значения. В период исследования все остальные теплотехнические и технологические параметры по возможности поддерживались постоянными. Перед внесением возмущения в течение 2-3 мин выдерживался стационарный режим плавки. Опыты проведены в период конца плавления и доводки.

По кривым разгона были определены коэффициенты передачи $k_{\text{н}}$ и нанесены на графики в функции среднего значения возмущений:

$$A_{\text{ср}} = (A_{\text{н}} + A_{\text{к}})/2,$$

где $A_{\text{н}}$ и $A_{\text{к}}$ – начальное и конечное значение возмущения.

Как видно на рис. 18.84, при всех видах возмущения тепловые потоки в рабочем пространстве сталеплавильной печи нелинейны, так как коэффициент передачи заметно меняется в различных диапазонах вносимого возмущения. Интересно подчеркнуть линейный характер изменения самого коэффициента передачи в функции $BQ_{\text{н}}^{\text{p}}$, $\alpha_{\text{кл}}$ и $P_{\text{св}}$ (кроме случая изменения $P_{\text{св}}$ в начале рабочего пространства).

С увеличением тепловой нагрузки коэффициенты передачи для тепловых потоков на свод ($q_{\text{св}}$) и ванну ($q_{\text{в}}$) в конце и начале (по ходу факела) рабочего пространства непрерывно уменьшаются, причем в конце печи $k_{\text{п}}$ имеет несколько большие значения, чем в начале (см. рис. 18.84, а).

При возмущении по коэффициенту расхода воздуха изменения $k_{\text{п}}$ для тепловых потоков на ванну и свод усложняются. В начале рабочего пространства $k_{\text{п}}$ имеет как положительные, так и отрицательные значения. Обе прямые пересекают ось абсцисс при $\alpha_{\text{кл}} = 1,26-1,30$, что свидетельствует о наличии экстремума. С ростом коэффициента расхода воздуха $k_{\text{п}}$ уменьшается. В конце рабочего пространства он имеет только отрицательные значения, наклон графиков меньше, располагаются они ниже графиков $k_{\text{п}} = f(\alpha_{\text{кл}})$ в начале печи (см. рис. 18.84, б).

При возмущении по давлению под сводом величина $k_{\text{п}}$ в конце печи с ростом $P_{\text{св}}$ заметно уменьшается, но всегда положительно. В начале печи значения $k_{\text{п}}$ отрицательны. С ростом $P_{\text{св}}$ до 30–31 Н/м² они увеличиваются, а при более высоких значениях $P_{\text{св}}$ остаются постоянными (см. рис. 18.84, в).

На основе этих экспериментальных данных получены уравнения прямых и найдены интегралы по условию $k_{\text{п}} = dq/dp$, где q – тепловой поток, p – любой из трех параметров теплового режима. Интегральные уравнения, отражающие характер, зависимости тепловых потоков от $BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$, $\alpha_{\text{кл}}$ и $P_{\text{св}}$ (см. рис. 18.85), позволяют сделать некоторые выводы о статических характеристиках рассматриваемого объекта.

Наиболее четкая зависимость получена при возмущении, вносимом тепловой нагрузкой (см. рис. 18.85, а): с ростом $BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$ тепловые потоки на ванну и свод увеличиваются по затухающим кривым; наиболее отчетливо проявляется затухание при $BQ_{\text{н}}^{\text{р}} > 25-26$ МВт.

Зависимость тепловых потоков от $\alpha_{\text{кл}}$ (см. рис. 18.85, б) выражена слабее. В какой-то мере это объясняется несоответствием значений $\alpha_{\text{кл}}$ фактическим значениям коэффициента расхода воздуха $\alpha_{\text{т}}$, что было обнаружено по анализу состава дымовых газов.

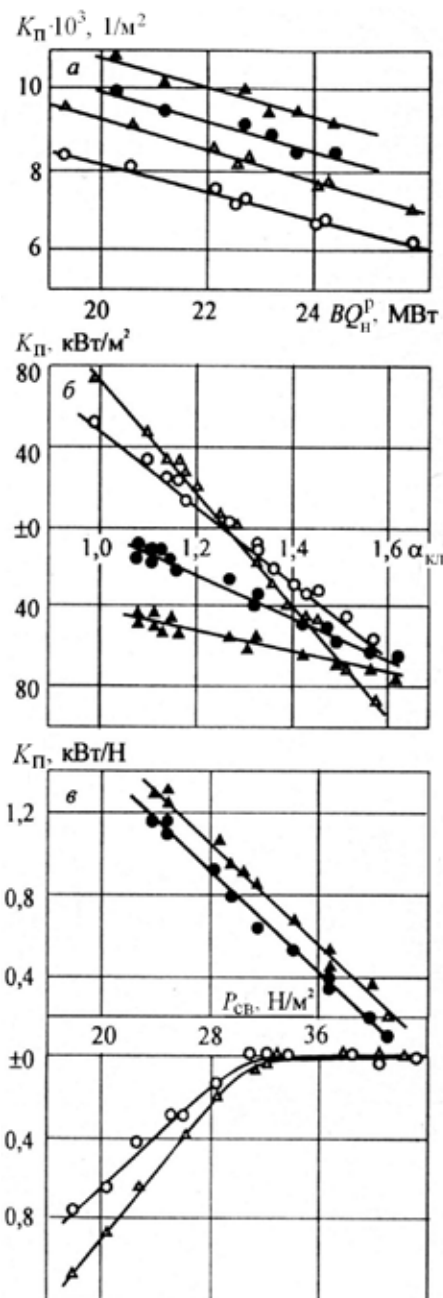


Рис. 18.84. Изменение коэффициентов передачи для тепловых потоков на свод (▲, Δ) и ванну (●, ○) в конце (▲, ●) и в начале (Δ, ○) рабочего пространства в зависимости от средних значений тепловой нагрузки (а), коэффициента расхода воздуха на клапане (б) и давления под сводом (в)

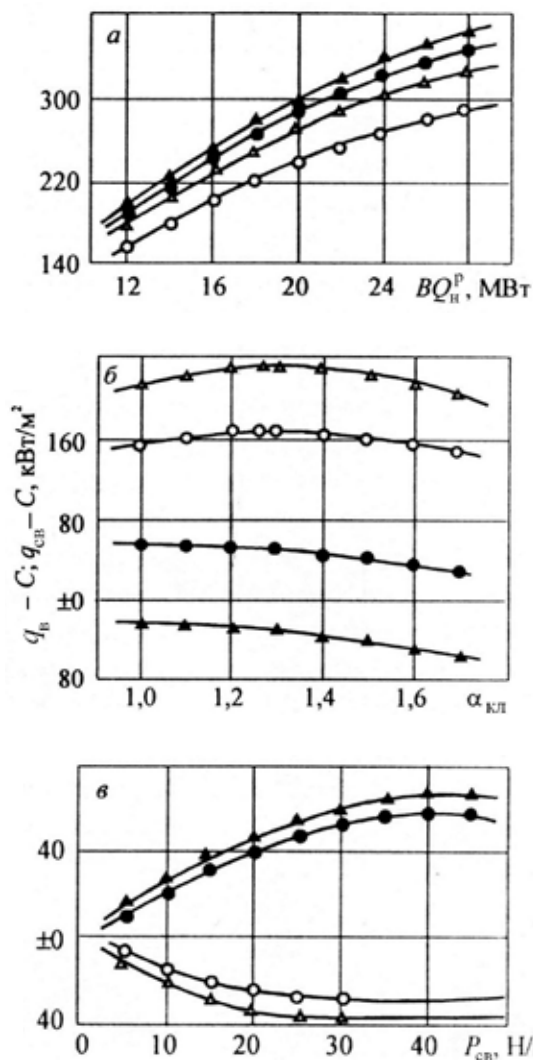


Рис. 18.85. Тепловые потоки в функции BQ_H^p (а), $\alpha_{\text{кл}}$ (б) и $P_{\text{св}}$ (в) на свод (\blacktriangle , \triangle) и ванну (\bullet , \circ) в начале (\triangle , \circ) и в конце (\blacktriangle , \bullet) рабочего пространства

При возмущении по давлению под сводом характер кривых q_v и $q_{\text{св}}$ в начале и в конце рабочего пространства резко отличается. Если в конце печи в пределах $P_{\text{св}} = 20-40 \text{ Н/м}^2$ значения q_v и $q_{\text{св}}$ возрастают, то в начале рабочего пространства они практически не зависят от давления под сводом (рис. 18.85, в). Более значительное влияние $P_{\text{св}}$ на тепловые потоки обнаруживаются в интервале $0-20 \text{ Н/м}^2$.

В этих пределах в начале печи с ростом давления под сводом тепловые потоки на ванну и свод уменьшаются, а в конце печи увеличиваются. Вероятно, здесь сказывается характер зависимости длины факела от подсосов: с ростом давления под сводом длина факела увеличивается.

Используемые для измерения тепловых потоков термозонд и радиометр являются инерционными приборами. Их постоянные времени, очевидно, соизмеримы с аналогичными параметрами рабочего пространства печи. Чтобы получить динамические характеристики термозонда и радиометра, их помещали в вертикальный канал сталеплавильной печи и теплоприемники мгновенно затеняли водоохлаждаемым экраном. Величина вносимого возмущения достигала 50-100 %. Запись кривых производилась с помощью электронного потенциометра.

Как видно из рис. 18.86, приборы можно приближенно считать статическими звеньями первого порядка и характеризовать их динамические свойства постоянной времени. Для термозонда и радиометра, работающих в комплекте с потенциометром, в среднем из 13-15 кривых на каждый прибор получили $T_T = 23$ с и $T_P = 16$ с. Среднеквадратичное отклонение составляло 7-10 %.

Из экспериментальных кривых разгона тепловых потоков в рабочем пространстве сталеплавильной печи можно выделить динамические характеристики объекта в «чистом» виде, если рассматривать его как последовательно соединенные измерительное звено и рабочее пространство печи и аппроксимировать как статическое звено второго порядка с чистым запаздыванием. Поскольку измерительное звено не имело запаздывания, то собственно объект аппроксимируется элементарными звеньями чистого запаздывания и первого порядка. Коэффициенты дифференциального уравнения второго порядка определяются по методу разбиения кривой разгона на участки.

Для примера на рис. 18.87 показаны кривые разгона тепловых потоков при изменении BQ_H^p , $\alpha_{кл}$ и $P_{св}$ в шести интервалах. Как видим, отклонение экспериментальных кривых от расчетных не превышает 5-7 % от наибольшей величины изменения тепловых потоков в процессе снятия кривой разгона.

Аналогично обработаны и другие кривые (3-4 графика для каждого вида возмущения при различном направлении тепловых потоков).

При возмущении по тепловой нагрузке постоянная времени для $q_{\text{в}}$ была примерно на 15 % меньше постоянных времени для $q_{\text{в}}$ и $q_{\text{ст}}$ ($q_{\text{ст}}$ – тепловые потоки на заднюю стенку печи). При этом значения постоянных времени изменялись в пределах 10-16 с.

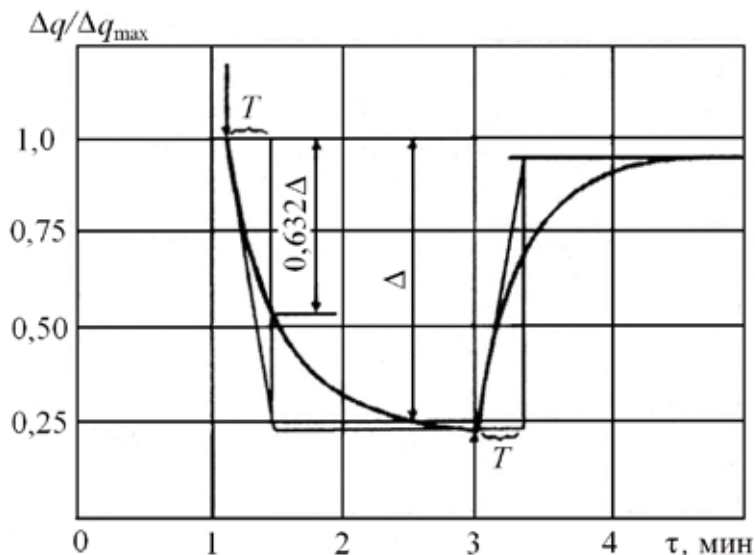


Рис. 18.86. Типичная кривая разгона теплоприемника термозонда при уменьшении и увеличении теплового потока (стрелками перед постоянной времени T отмечен момент внесения возмущения)

При изменении $\alpha_{\text{кл}}$ или $P_{\text{св}}$ постоянные времени для $q_{\text{в}}$ и $q_{\text{ст}}$ были больше, чем при возмущении по BQ_{H}^{P} :

$$\frac{T_{\alpha}}{T_{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}}} = 1,5 - 1,7; \quad \frac{T_{P_{\text{св}}}}{T_{BQ_{\text{H}}^{\text{P}}}} = 2,2 - 2,4.$$

Абсолютные значения постоянных времени составляли 15-28 с при возмущении по $\alpha_{\text{кл}}$ и 20-38 с при возмущении по $P_{\text{св}}$. Во всех рассмотренных случаях время чистого запаздывания не превышало 4-5 с. В опытах была также замечена закономерность в изменении постоянных времени при внесении П-образных возмущений*).

* Два ступенчатых возмущения противоположного направления, смещенные во времени на некоторую величину Δt .

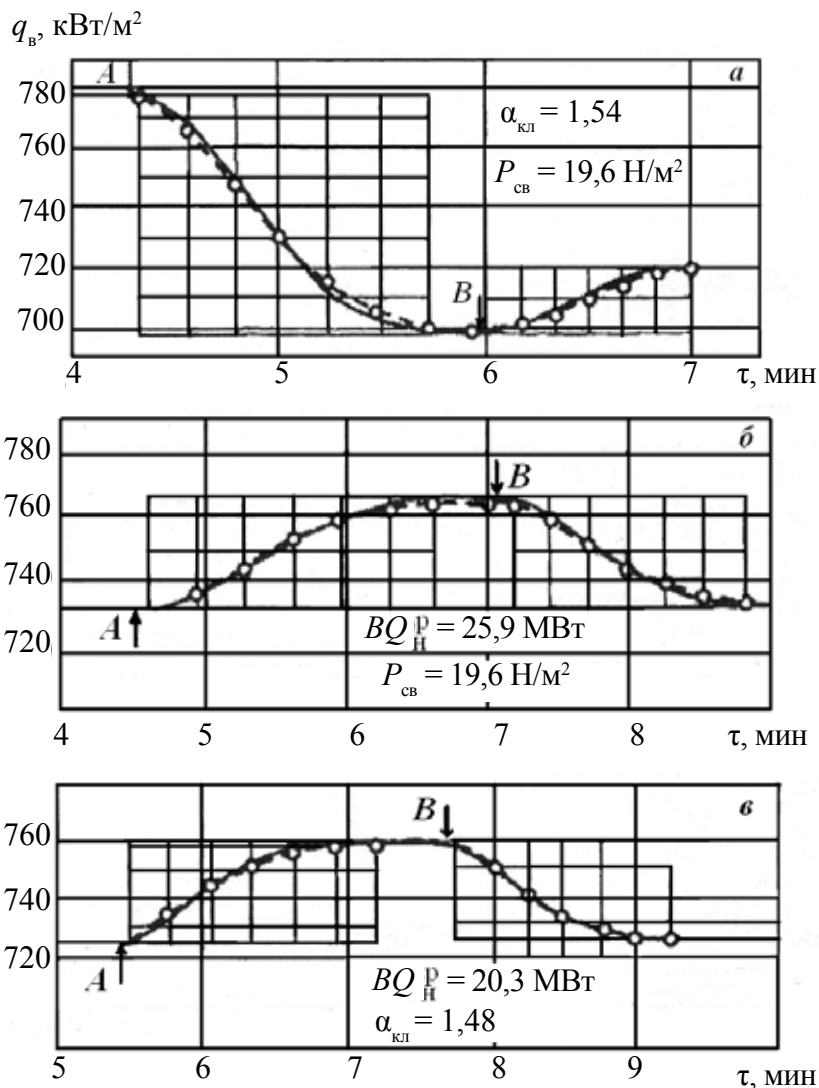


Рис. 18.87. Кривые разгона тепловых потоков в конце рабочего пространства сталеплавильной печи по экспериментальным (сплошные линии) и расчетным (пунктир) данным: а – по тепловой нагрузке (А и В – изменение BQ_{H}^{P} соответственно с 28,4 до 19,2 и с 19,2 до 23,8 МВт); б – по коэффициенту расхода воздуха (А и В – изменение $\alpha_{\text{кл}}$ с 1,65 до 1,06 и с 1,06 до 1,74); в – по давлению под сводом (А и В – изменение $P_{\text{св}}$ с 20,6 до 35,4 и с 35,4 до 22,6 Н/м²)

Постоянная времени для начального изменения параметра в сторону уменьшения или увеличения от какого-либо относительного стабильного рабочего состояния (T_1), как правило, была больше постоянной времени для обратного изменения параметра к исходному значению (T_2): $T_1/T_2 = 1,13/1,31$. Иначе процесс самовыравнивания тепловых потоков при отклонении рассматриваемого параметра от установившегося значения в течение сравнительно длительного времени протекает медленнее, чем при возвращении параметра к первоначальному значению через сравнительно небольшой отрезок времени.

Методики и данные о приближенных динамических и статических характеристиках рабочего пространства плавильных печей по тепловым потокам могут быть использованы при разработке и эксплуатации средств контроля и регулирования теплового состояния печей.

Оптимизация длины факела и диагностика температур печей. Результаты оценки влияния длины факела на результирующие тепловые потоки на поверхность тепловосприятия для плавильных печей с использованием зональных методов [18.3, рис. 14.3] позволили выявить наличие оптимума длины факела по теплоусвоению для сравнительно коротких светящихся факелов (при относительной длине факела $L_{\phi} = 0,4-0,5$) и демонстрируют наибольшее теплоусвоение у наиболее коротких несветящихся факелов.

Эти результаты являются обоснованием технологического принципа рассмотрения и решения оптимизационной задачи распределения выгорания топлив по длине рабочего пространства печи, который заключается в необходимости наибольшей концентрации (сдвига) тепловой мощности для достижения максимума теплоотдачи на подающей топливо стороне (в конце рабочего пространства печи – для противотока – по ходу движения металла). Некоторое растягивание выгорания топлива по длине печи возможно при рассмотрении и учете комплексных критериев оптимизации нагрева, включающих, например, кроме теплоотдачи, ещё и угар металла, перепад температур по сечению заготовок, стойкость кладки и т. п. Этот технологический принцип распределения топлива значительно облегчает процедуры оптимизации при решении задач управления процессами нагрева.

Наличие оптимума длины светящегося факела у сталеплавильных и стекловаренных печей при относительной длине факела

$L_{\phi} \approx 0,3-0,4$ свидетельствует об эффективности очень короткого свещающегося факела и мер по укорочению таких факелов (подача интенсификаторов, обогащение воздуха кислородом, уменьшение выходного сечения сопел горелок (форсунок)).

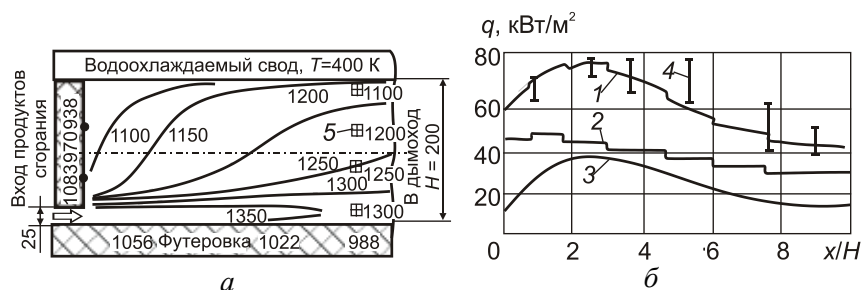


Рис. 18.88. Вычислительная диагностика полей температур (а) и тепловых потоков на свод (б) в рабочем пространстве камеры сгорания ДЗУ-методом (методом крупной и мелкой сетки) и сравнение с экспериментальными данными.

Цифры у кривых и точек – температуры, К; 4 – диапазон изменения экспериментальных значений результирующих тепловых потоков; 5 – экспериментальные значения температур продуктов сгорания; 1, 2, 3 – соответственно результирующий тепловой поток, радиационная и конвективная составляющие; x – расстояние по длине камеры; H – высота камеры

На рис. 18.88 представлены возможности детализированной диагностики температур в камерах сгорания и предсказания с помощью зонально-узловой модели как температур отходящих газов, так и локальных тепловых потоков с оценкой минимальных и максимальных значений [18.1; 18.23; 18.25; 18.32; 18.45; 18.210].

Это, как известно, необходимо на стадии проектирования теплофизических агрегатов и АСУ ТП (для выбора представительных точек размещения датчиков и предотвращения возможных аварийных ситуаций).

Способ наладки и контроля тепловой работы плавильной печи. Оптимизация тепловой работы плавильных печей является одним из наиболее эффективных способов достижения высоких технико-экономических показателей.

Одним из наиболее простых и широко распространенных методов оценки теплового состояния рабочего пространства плавиль-

ных печей являются пирометрические измерения с помощью оптических или радиационных пирометров.

В процессе экспериментальных исследований тепловой работы плавильных печей нередко используют теплотрические измерения, выполняемые с помощью специальных тепломеров различной конструкции, в частности, термозонда, позволяющих измерять тепловые потоки в рабочем пространстве.

Обеспечивая высокую оперативность, теплотрические исследования, тем не менее, не нашли широкого применения из-за их сложности и трудоемкости.

При исследовании тепловой работы сталеплавильных печей наиболее широко используют балансовые методы, в частности метод обратного теплового баланса, который позволяет определить «мгновенные» значения теплопоглощения ванны. Однако этот метод очень трудоемок и, вследствие ряда вынужденных допущений, вносящих дополнительные неточности при определении величины теплопоглощения, дает погрешность около 5 %. Совершенствование метода обратного теплового баланса в течение многих лет велось главным образом в направлении более точного определения отдельных статей баланса.

Анализ результатов исследований теплообмена в сталеплавильных печах позволил сделать предположение о наличии прямой связи между теплопередачей к ванне и количеством теплоты отходящих дымовых газов. Следует отметить, что ранее делались попытки использовать для оценки теплообмена в рабочем пространстве плавильной печи температуру дыма. На Магнитогорском металлургическом комбинате была создана система автоматического управления тепловым режимом большегрузной сталеплавильной печи, использующей импульс измерения температуры стенки вертикального канала, которая прямо связана с температурой отходящих дымовых газов. Однако в этом случае не учитывалось количество дыма и его состав, от которых зависит теплосодержание отходящих газов. Вне всякого сомнения, количество теплоты, не использованной в рабочем пространстве, полнее характеризует теплопоглощение ванны (при постоянной тепловой нагрузке), чем температура дыма. Кстати, контроль по температуре отходящих газов является частным случаем контроля по теплосодержанию дыма. Необходимо

подчеркнуть, что величина потерь отходящими газами имеет наибольшее значение в тепловом балансе многих плавильных печей (до 55-60 %) и, что особенно важно, наиболее сильно и быстро реагирует на любые изменения условий теплообмена в рабочем пространстве. Резкое изменение какого-либо из параметров теплообмена вызывает быстрое изменение, с последующей стабилизацией, теплового состояния в печи, а следовательно, и быстрое изменение теплосодержания дымовых газов за рабочим пространством печи. Что касается теплового состояния больших масс кладки и ванны, то такое изменение происходит очень медленно. Однако это обстоятельство даже благоприятствует использованию предлагаемого метода, который не требует знания всех статей баланса. Поэтому сравнение теплообмена по теплосодержанию дыма при нескольких значениях исследуемого параметра займет столь небольшое время, что влияние технологического режима практически будет незаметным, решающее же значение будет иметь лишь изменение самого параметра. При разработке способа использовано уравнение теплового баланса рабочего пространства плавильной печи

$$BQ_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{экз}} = Q_1 + Q_2 + Q'_{\text{пот}} + Q_{\text{выб}} + Q_{\text{луч}}, \quad (18.269)$$

где $BQ_{\text{н}}^{\text{р}}$ – химическая теплота топлива; $Q_{\text{в}}$ – физическая теплота подогретого воздуха; $Q_{\text{экз}}$ – теплота экзотермических реакций, происходящих в ванне; Q_1 – количество теплоты, усвоенной ванной (нагрев металла и шлака и затраты на эндотермические реакции); Q_2 – потеря теплоты с отходящими газами, условно названными теплосодержанием дыма; $Q'_{\text{пот}}$ – суммарное количество теплоты, проходящей через внутреннюю поверхность кладки рабочего пространства; $Q_{\text{выб}}$ – потери теплоты с выбивающимися через окна и отверстия газами; $Q_{\text{луч}}$ – потери теплоты излучением, через периодически открывающиеся окна.

При постоянной величине давления над сводом и закрытых заслонками окнами можно считать $Q_{\text{выб}}$ и $Q_{\text{луч}}$ величинами постоянными. Тогда при неизменной величине прихода теплоты ($BQ_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{экз}} = \text{const}$) минимальное значение теплосодержания дыма будет совпадать с максимумом теплопоглощения ванны при условии, что изменение величин теплопоглощения ванны ($Q_{\text{в}}$) и

проходящей через поверхность кладки теплоты ($Q'_{\text{пот}}$) при изменении теплового режима будут иметь одинаковый знак.

Известно, что зависимость теплового КПД печи (η_t) от основных режимных параметров имеет экстремальный характер. Следовательно, наивыгоднейшее значение какого-либо параметра p_i при прочих равных условиях определяется равенством $\partial \eta_t / \partial p_i = 0$. Для данного значения тепловой нагрузки это равносильно условию $\partial Q_m / \partial p_i = 0$. Согласно предположению о соответствии в изменении теплопоглощения ванны и общего теплового потока через внутреннюю поверхность стен рабочего пространства при том же значении варьируемого параметра соотношение $\partial Q'_{\text{пот}} / \partial p_i$ должно быть равно нулю. Поэтому можно записать $\partial(Q_m + Q'_{\text{пот}}) / \partial p_i = 0$. Очевидно, что увеличение Q_m и $Q'_{\text{пот}}$ в рабочем пространстве равносильно соответствующему уменьшению количества теплоты дымовых газов за убирающей головкой (Q_2) и наоборот. Следовательно, оптимальное значение параметра находится из более простого условия: $\partial p_i = 0$. Таким образом, можно определить оптимальное значение того или иного параметра (при $BQ_n^p = \text{const}$) только по величине Q_2 без составления уравнения теплового баланса, причем достаточно знать относительное изменение величины теплосодержания дыма.

Предложенный в разработке авторов, А.И. Черногорова, С.Н. Гущина и др. авторов [18.23; 18.209] метод контроля тепловой работы плавильной печи предполагает все же надежный замер величины теплосодержания дымовых газов. Наиболее сложным является измерение количества покидающих рабочее пространство газов. Непосредственное измерение расхода дыма представляет очень большие трудности. Чаще всего количество продуктов горения определяют расчетным путем по расходам топлива и воздуха.

Хотя при исследовании характера изменения химсостава отходящих газов по сечению пролета по результатам 420 анализов дымовых газов подобия полей концентраций обнаружено не было, однако плотность газов и их теплоемкость (при нормальных условиях), как показали расчеты, изменялись очень мало. Колебания, как правило, не превышали 0,2 %.

Поле температур, измеренных над перевальной стенкой платино-платинородиевой термопарой, защищенной алуновым колпачком, отличалось высокой равномерностью (всего было проведено 650 замеров). Средняя по сечению пролета температура дыма (1428 °С) отличалась от максимальной и минимальной на 28 °С. Множитель преобразования температур $K_1 = t_d^{\max} / t_d^{\text{cp}}$, подсчитанный для различных периодов плавки и считанный для различных периодов плавки и при различной степени заполнения шлаковиков, практически оставался постоянным (1,013-1,020). Это позволяет утверждать о наличии автомодельности в измерении температур, т. е. в двух произвольно выбранных точках $t_d' / t_d'' = \text{const}$. Однако для непрерывного измерения температуры дымовых газов использовать термопару невозможно.

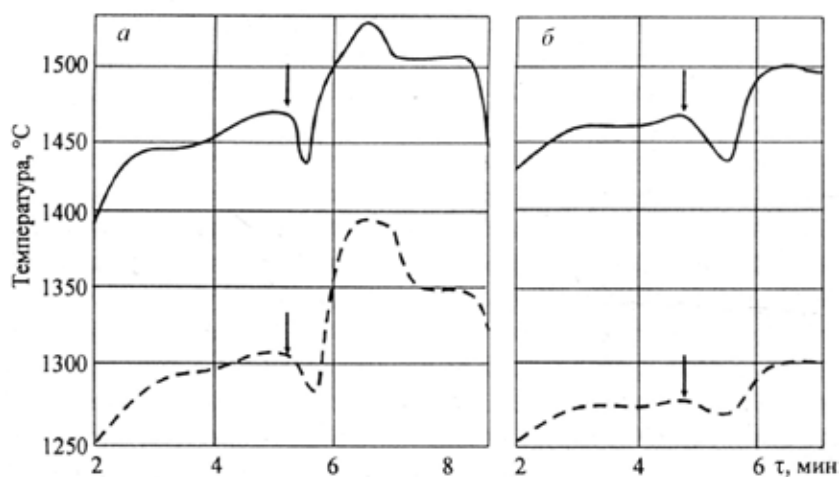


Рис. 18.89. Характер изменения температуры дыма (сплошные линии) и показаний радиационного пирометра (пунктирные линии) при изменении тепловой нагрузки – а и расхода воздуха – б. Стрелками отмечены моменты изменения параметра

Как было показано в работе Г.М. Глинкова, целесообразнее применить радиационный пирометр, который визируют в сечении над перевальной стенкой через боковое отверстие на противоположную

стенку регенератора. Пирометр помещали в специально изготовленную водоохлаждаемую фурму с подачей компрессорного воздуха для отсечки потока горячих газов и для отдува пыли от линзы пирометра. Показания радиационного пирометра непрерывно записывали при помощи самопишущего электронного потенциометра с ускоренным перемещением диаграммной бумаги. Радиационный пирометр практически не нуждался в уходе и ни разу не выходил из строя. Как показало сравнение одновременных измерений температуры дыма с помощью термопары и температуры боковой стенки регенератора (радиационный пирометр), обе кривые практически эквивалентны, и разность показаний остается постоянной (см. рис. 18.89).

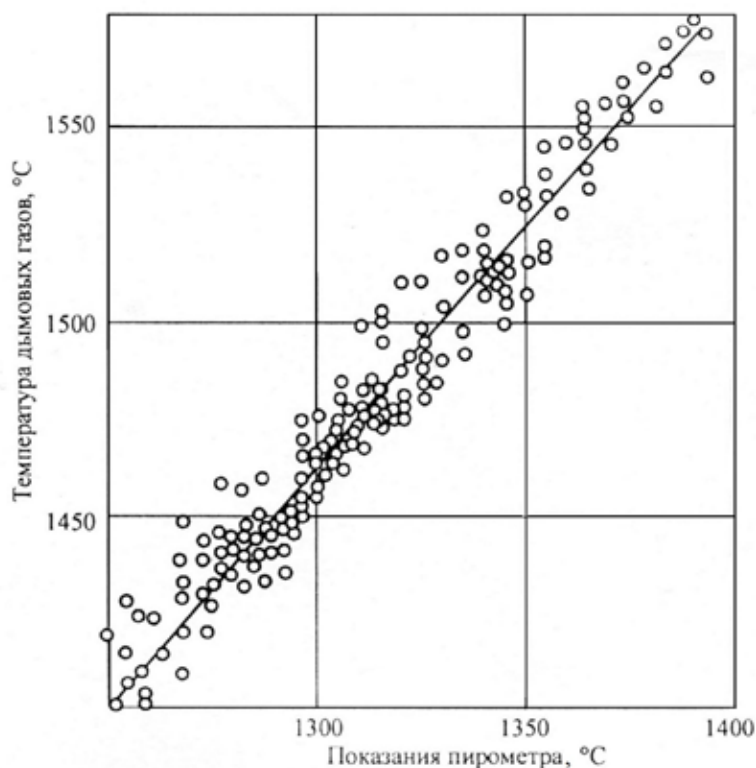


Рис. 18.90. Связь между температурой дымовых газов на входе в регенератор и показаниями радиационного пирометра(100-т сталеплавильная печь)

Было установлено, что показания радиационного пирометра линейно связаны с температурой дымовых газов, измеренной в пролете над перевальной стенкой с помощью термопары (см. рис. 18.90). Следовательно, по показаниям радиационного пирометра можно было определить температуру дыма на входе в регенератор. Однако предварительно установленная линейная зависимость может немного изменяться в ходе кампании вследствие изменения распределения потока газов по сечению в связи с заносом шлаковников и насадок. Поэтому рядом с фурмой пирометра было предусмотрено отверстие для термопары, с помощью которой периодически в ходе кампании проверяли связь показаний пирометра с температурой дыма. Отклонение контрольных точек от градуировочной кривой не превышало 2 %.

Отметим, что метод определения температуры отходящих продуктов сгорания сталеплавильной печи (с нагревом ванны в доводку до 1720 °С) по температуре стенки вертикального канала применялся также еще и в ранних работах В. Г. Лисиенко (под руководством Н.И. Кокарева) на печах для выплавки броневой стали [18.211] при наладке их тепловой работы (см. рис. 18.91).

Представим особенности получения градуировочных графиков, в этих исследованиях экспериментальная часть выполнялась автором.

Для непрерывного определения температуры воздуха и продуктов горения со стороны задней стенки в обеих головках установили стационарные радиационные пирометры, визируемые через отверстия сечением 120 x 120 мм на внутреннюю поверхность стенки вертикального канала. Для повышения точности измерений и защиты пирометров от воздействия высоких температур использовали экраны и отдув компрессорным воздухом.

Показания радиационных пирометров записывались электронным потенциометром.

Для градуирования и контроля показаний радиационных пирометров температуру воздуха и продуктов горения периодически определяли отсасывающими водоохлаждаемыми термопарами, вводимыми в вертикальные каналы на высоте 1,5 м от уровня рабочей площадки.

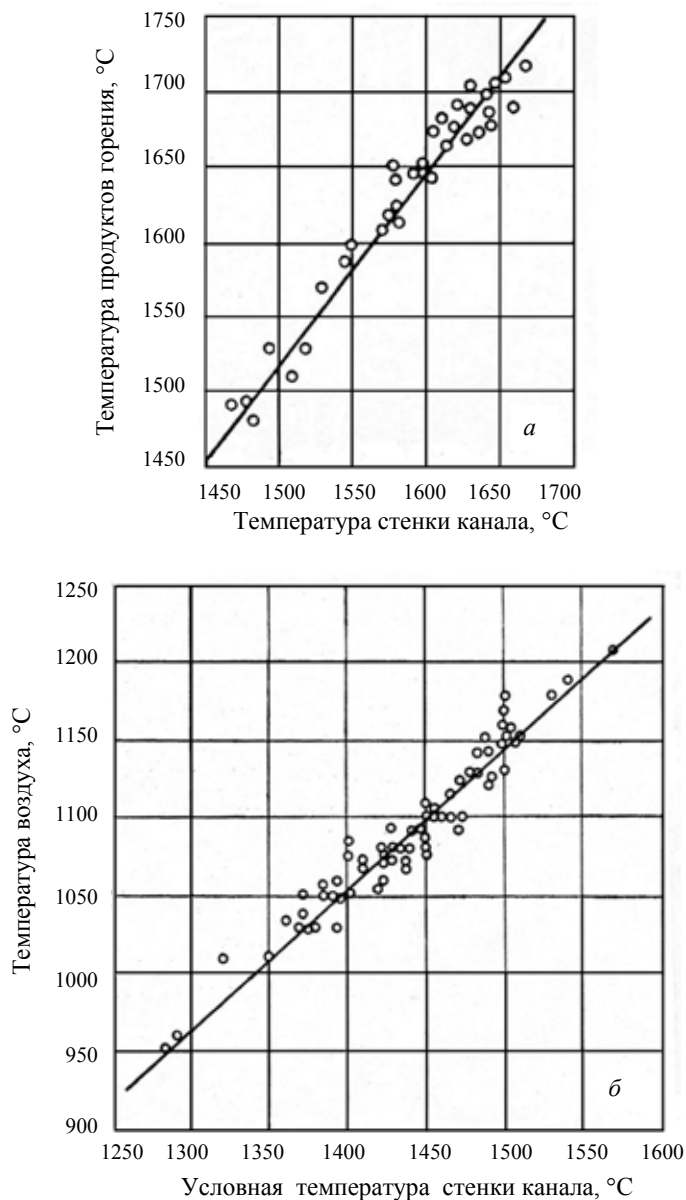


Рис. 18.91. Зависимость температуры стенки вертикального канала от температуры продуктов горения – *a* и температуры воздуха – *б* (70-т сталеплавильная печь)

Для лучшего экранирования спая термопары от излучения стен каналов головку её защитили экраном из электрокорунда (около 97 % Al_2O_3) с отверстиями по периферии. При скорости прососа 160-170 м/с ошибка измерения термопары (определяемая методом удвоения скоростей) не превышала 10-15° для температуры воздуха и 20-25° для продуктов горения.

Использование платинородий-платиновых и вольфрам-молибденовых термоэлектродов с открытым спаем позволило снизить инерцию прибора до 8-10 с и включать эжектор термопары при измерении температуры продуктов горения на очень короткое время.

Применение при этом защитных колпачков, по-видимому, нецелесообразно, так как при нагреве спая до той же температуры удлиняется воздействие на него высоких температур вследствие увеличения инерции прибора (до 2-3 мин).

При температуре продуктов горения 1600-1700° платинородий-платиновая термопара выдерживала лишь 6-7 кратковременных измерений, а вольфрам-молибденовая значительно больше, причем и смена ее спая оказывалась проще (вместо сварки термоэлектродов достаточно их скручивание).

При построении графиков рис. 18.91 учитывали, что если заменить действительную температуру стенки t_c условной, определяемой по формуле

$$t_{c,y} = t_c + \frac{t_c - 1550}{2}, \quad (18.270)$$

где 1550 – температура, условно принятая за начало отсчета (°C), то зависимость между условной температурой стенки и температурой воздуха оказалась близкой к прямой. При несимметричной тепловой работе печи и больших колебаниях в расходе и температуре вентиляторного воздуха температура стенки вертикального канала и при прохождении продуктов горения зависит от температуры стенки в предыдущем (воздушном) цикле перекидки.

В этом случае при построении градуировочных кривых для продуктов горения было рекомендовано пользоваться формулами типа (18.270).

Таким образом, для сталеплавильных печей подтвердилась возможность непрерывного упрощенного определения температуры

продуктов горения и воздуха по ходу плавки путем измерения температуры внутренней поверхности стен вертикальных каналов.

Примененная методика позволила осуществлять непрерывный контроль за теплопоглощением ванны и выявить оптимальные параметры теплового режима (см. рис. 18.94).

Возможность использования описанного метода определения теплосодержания дыма для оценки оптимальных условий горения газомазутного факела была проверена на среднетоннажной сталеплавильной печи с одноканальными головками. Узел регулирования горения состоял из регуляторов расхода мазута и природного газа и регулятора соотношения газ – воздух. Как известно, регулятор соотношения является одним из важнейших узлов в схеме автоматизации теплового режима сталеплавильных печей и во многом определяет возможности экономии топлива. Однако в данном случае регулятор не учитывает количество воздуха, необходимого для сжигания мазута, и его приходится настраивать на некоторый избыток вентиляторного воздуха, достаточного для полного сжигания не только газа, но и мазута. В различные периоды плавки доля мазута могла изменяться от 20 до 50 %, поэтому сталевару приходилось менять задание регулятору соотношения, опираясь только на собственный опыт. Очевидно, что, используя величину теплосодержания дыма можно очень точно и быстро определить оптимальный расход вентиляторного воздуха при любом изменении соотношения мазут – природный газ.

Для удобства определения теплосодержания дыма была построена номограмма, позволяющая по измеренным значениям скоростного напора и температуры отходящих газов сразу найти общее теплосодержание дыма (см. рис. 18.92).

Для этого при различных значениях температуры газов в интервале 1300-1600 °С через каждые 100° провели полный расчет теплосодержания отходящих газов, изменяя при этом величину скоростного напора. Теплоемкость дыма и его плотность брали по среднестатистическим данным ранее проведенных анализов отходящих газов.

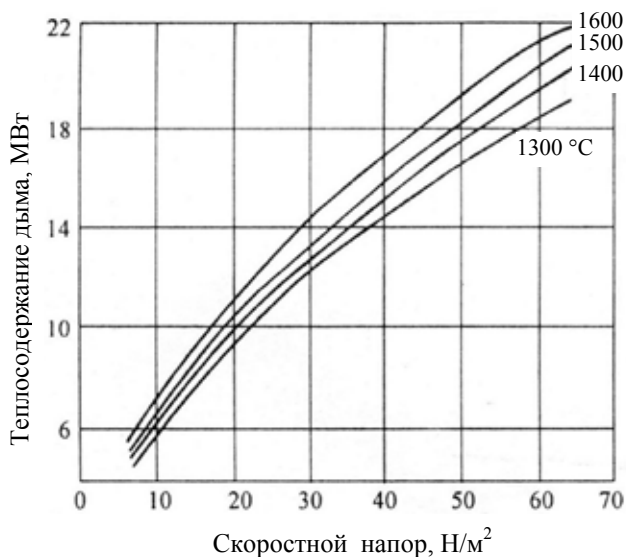


Рис. 18.92. Номограмма для определения теплосодержания дыма на входе в регенератор по величине скоростного напора и температуре дымовых газов (цифры у кривых)

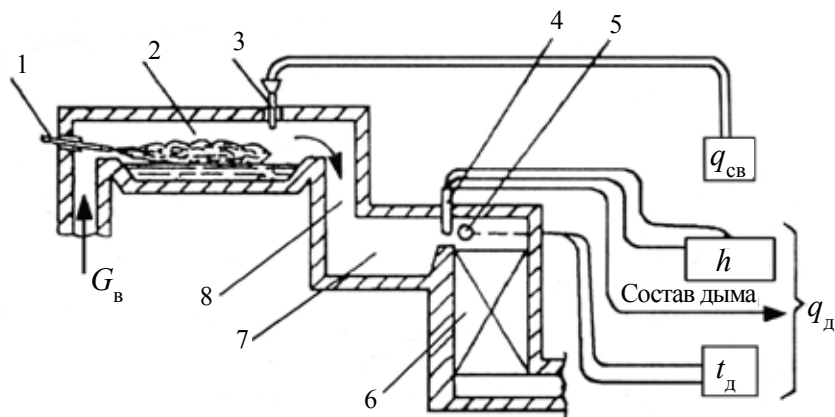


Рис. 19.93. Принципиальная схема измерений при определении связи теплосодержания дыма (q_d) с тепловыми потоками на свод ($q_{св}$) при изменении расхода вентиляторного воздуха (G_v):

- 1 — газозапутная горелка; 2 — рабочее пространство печи; 3 — радиометр; 4 — пневмометрическая трубка; 5 — радиационный пирометр; 6 — регенератор; 7 — шлаковик; 8 — вертикальный канал; t_d — температура дыма; h — динамический напор

Эффективность внешнего теплообмена в рабочем пространстве оценивали по показаниям радиометра полусферического тепло-восприятия, установленного на продольной оси главного свода на уровне третьего (крайнего по ходу факела) окна сталеплавильной печи. Ранее проведенные опыты по исследованию тепловых потоков показали, что они изменяются синхронно. Поскольку тепловой поток на ванну линейно связан с величиной теплопоглощения, то отсюда следует, что должна существовать линейная связь и между теплопоглощением ванны и тепловым потоком на свод.

Общая схема измерений при определении связи теплосодержания дыма с тепловым потоком на свод при изменении расхода вентиляторного воздуха показана на рис. 18.93. Для измерения динамического напора потока дымовых газов над перевальной стенкой через охлаждаемую фурму, установленную в своде регенератора, вводили пневмометрическую трубку длиной 800 мм. Концентрация пыли перед регенератором была вдвое меньше, чем в вертикальном канале. Поэтому поверхность трубки за плавку покрывалась лишь легким налетом пыли, очень легко удаляемой при кратковременной подаче струек компрессорного воздуха через отверстия в фурме. Дополнительной очистки поверхности медной трубки от плавильной пыли не требовалось. Импульсные отверстия пылью не забивались, однако для профилактики их периодически (раз в день) продували компрессорным воздухом. Определение оптимального значения коэффициента расхода воздуха проводилось в конце периода плавления динамной стали при эксплуатационном тепловом режиме ($BQ_n^p = 25$ МВт, $P_{св} = 20$ Н/м²). Полученная графическая зависимость показала, что в рабочем пространстве печи тепловые потоки достигают максимума при том же значении коэффициента расхода воздуха ($\alpha = 1,18-1,23$), при котором теплосодержание дыма имеет минимум (см. рис. 18.94). Иначе говоря, максимум теплосодержания ванны достигается при минимуме потерь теплоты с отходящими газами. Определив минимум теплосодержания дыма на входе в регенератор, можно найти оптимальный для данного теплового режима расход воздуха, отвечающий максимальной теплоотдаче. Использование этого метода для контроля расхода воздуха на сталеплавильной печи позволило уменьшить расход топлива на 2,8 %, сократить длительность плавки и увеличить производительность печи.

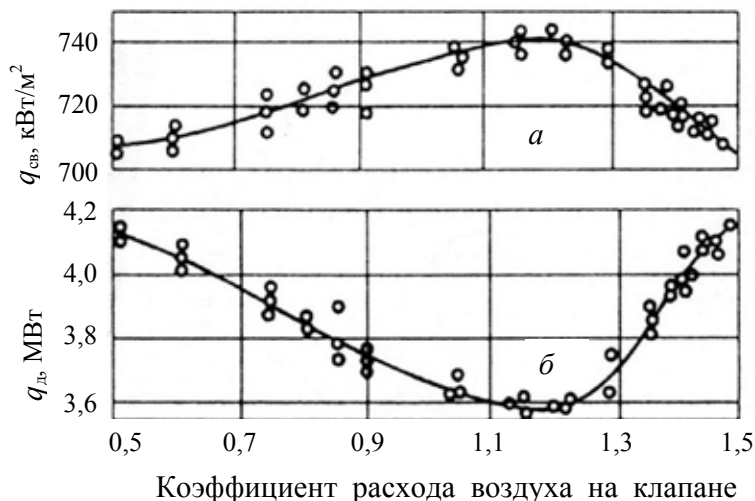


Рис. 18.94. Зависимость теплового потока на свод (*a*) и теплосодержания дыма (*б*) от коэффициента расхода воздуха

Импульс по q_d передается в специальное логическое устройство (оптимизатор) для воздействия на регулируемый параметр.

В. Г. Лисиенко, А.И. Черноголовым, С.Н. Гушиным, Г.Т. Тильком и Б.С. Балабановым способ контроля и наладки тепловой работы сталеплавильной печи был закреплен в авторском свидетельстве на изобретение [18.209]. При этом отмечено, что был известен способ контроля и регулирования тепловой работы сталеплавильной печи путем измерения тепловых потоков, который позволяет учитывать поглощение тепла ванной печи. Однако его трудно применить для оперативного контроля.

Для определения рациональных параметров теплового режима было предложено контролировать теплосодержание дымовых газов на входе в регенератор. Теплосодержание газов однозначно связано с теплопоглощением ванной печи. Получая информацию о теплопоглощении ванной можно оперативно определять рациональные параметры теплового режима печи.

Для определения теплосодержания газов измеряют динамический напор, температуру и состав дымовых газов на входе в регенератор. Результаты измерения передаются в вычислительное устрой-

ство, которое рассчитывает величину теплосодержания. Импульс от вычислительного устройства передается логическому устройству, которое воздействует на регулируемые параметры тепловой работы печи.

Отметим, что в рамках сотрудничества с Тюменской государственной архитектурной академией В. Г. Лисиенко было предложено использовать способ контроля теплосодержания продуктов сгорания при оптимизации тепловой мощности и КПД ГТУ с возможной минимизацией содержания кислорода в дымовых газах при регулировании соотношения «газ – воздух».

Диагностика количества и теплосодержания дымовых газов методом локальных замеров

Как отмечалось, величина теплосодержания продуктов горения за рабочим пространством сталеплавильной печи составляет значительную долю в общем балансе тепла и относительно сильно и быстро изменяется при изменении условий теплообмена в печи. Полное теплосодержание дыма можно определить по расходу, температуре и составу дымовых газов. Наиболее сложным является изменение количества покидающих рабочее пространство продуктов горения.

Величина теплосодержания дымовых газов играет, таким образом, значительную роль в балансовых тепловых расчетах, в том числе и в методе обратного теплового баланса при определении теплоусвоения нагреваемым и расплавляемым материалом.

Кроме того, как показано выше, эта величина может явиться весьма представительным параметром при диагностике компонентов теплового режима высокотемпературных печей.

В данной работе, проведенной С.Н. Гузиным, В. Г. Лисиенко и А.И. Черноголовым, показана возможность упрощенной оценки теплосодержания дымовых газов высокотемпературных печей, но при этом требуется проведение специальных исследований [18.212].

Эти исследования являются примером необходимости проведения достаточно тщательного анализа и дополнительных наблюдений при оценках отдельных составляющих тепловых балансов в высокотемпературных печах и агрегатах.

Чаще всего количества дымовых газов определяют расчетным путем. Однако рассчитать достаточно точно количество дыма по

расходу топлива и вентиляторного воздуха нельзя из-за значительного газовыделения из ванны, подсосов холодного воздуха и выбивания продуктов горения. Невязка между расчетным и фактическим количествами дымовых газов достигает, как показал опыт ВНИИМТ, более 20 %.

Для определения количества дымовых газов, покидающих рабочее пространство сталеплавильной печи, целесообразно воспользоваться свойством автомодельности скоростных полей. Автомодельность ($Eu = f(Re) = \text{const}$, Eu и Re – числа подобия Эйлера и Рейнольдса) в условиях сталеплавильных печей была доказана экспериментами, проведенными на холодных моделях в работе А.В. Лепярчика. Однако на моделях нельзя было в достаточной мере воспроизвести условия движения газов в промышленных печах, отличающиеся неизотермичностью потока газов, влиянием на него технологических факторов, изменением конфигурации тракта в ходе кампании и т. д. Чтобы подтвердить существование автомодельности в сложных условиях неизотермических потоков, потребовалось проведение экспериментов непосредственно на промышленной печи.

Объектом исследований был выбран пролет над перевальной стенкой шлаковика. На пути от убирающей головки до этого сечения подсосы холодного воздуха невелики. Исключается влияние аккумуляции тепла насадками регенераторов, которые в значительной мере «сглаживают» изменение теплосодержания дыма.

Исследовался характер скоростных полей, полей температур, распределение отдельных компонентов дыма и коэффициента расхода воздуха в пролете над перевальной стенкой шлаковика 100-т сталеплавильной печи. Печь, работающая на холодной завалке, отапливается смесью природного газа и мазута (доля мазута – около 40 % по теплу). Методика исследований представлена в Т. 2, кн. 1 данного издания [18.2].

В выбранном сечении снимали поля в 20 точках. Водоохлаждаемый зонд длиной 5 м вводился через отверстие в боковой стенке пролета. Зонд состоял из пневмометрической трубки ВТИ, термопары и газоотборной трубки. Замеры проводились в периоды плавления и доводки. При снятии полей параметры теплового режима поддерживались постоянными, завалочные окна не открывались.

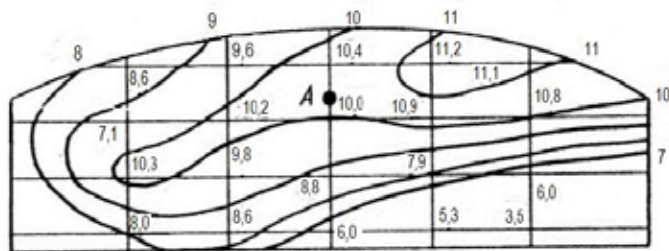
По полученным для каждой точки среднеарифметическим значениям скоростей w_d , температур t_d и коэффициентов расхода воздуха α в сечении пролета строились поля этих величин. Средние по сечению значения величин w_d , t_d и α определялись методом планиметрирования площадей.

Измерения проводили как в начале кампании при чистом шлаковике, так и при заполненном.

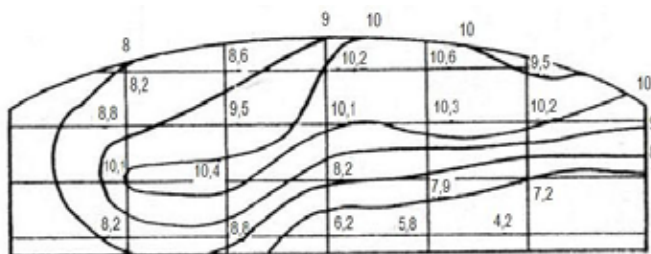
Исследования скоростных полей показали (см. рис. 18.95), что имеется довольно равномерное распределение скоростей дыма в исследуемом пролете. Линии равных значений скорости свидетельствуют о том, что поток продуктов горения немного смещен вправо и вверх. При заполнении шлаковика характер скоростного поля меняется очень незначительно. Аналогичен характер скоростного поля и в период доводки.

Сравнение скоростных полей, полученных при различных тепловых режимах, в различные периоды плавки, показало, что существует подобие кривых распределения скоростей, благодаря которому при различных значениях критерия Re сохраняется постоянным коэффициент неравномерности скоростного поля K_w (см. рис. 18.96). В ходе кампании этот коэффициент также меняется очень незначительно. Это изменение может быть учтено дополнительной градуировкой сечения. Таким образом, благодаря автомодельности скоростного поля можно по замеренному в одной выбранной точке (например, А на рис. 18.95) скоростному напору и подсчитанной для данных условий локальной скорости судить о средней по сечению скорости дымовых газов по ранее снятым в этом сечении скоростным полям.

При исследовании характера изменения состава продуктов горения по сечению пролета обнаружено, что наименьшее разбавление дыма подсосанным воздухом наблюдалось вблизи свода. Концентрация кислорода возрастала вблизи боковых стен, что указывает на значительный подсос воздуха через кладку. В верхней части сечения вблизи свода коэффициент расхода воздуха практически не изменялся при различном заполнении шлаковика (при тех же параметрах теплового режима) (см. рис. 18.97). Плотность газов и теплоемкость (при нормальных условиях), как показали расчеты, изменялись очень мало: колебания не превышали 0,2 %.



а



б

Рис. 18.95. Поля скоростей дыма (м/с) в пролете над перевальной стенкой в период плавления при чистом (а) и заполненном (б) шлаковике;
 $BQ_H^p = 25-26$ МВт, $P_{св} = 17,5$ Н/м², $\alpha_{кл} = 1,28-1,30$, доля мазута по теплу 50 %; А – выбранная точка локальных замеров

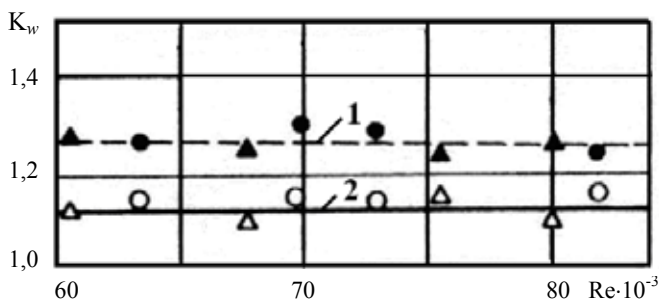


Рис. 18.96. Зависимость коэффициента неравномерности скоростного поля K_w от критерия Re : 1 – $K_w^{\max} = \frac{w_{\max}}{w}$; 2 – $K_w^A = \frac{w_A}{w}$; О, ● – при чистом шлаковике; △, ▲ – при заполненном шлаковике

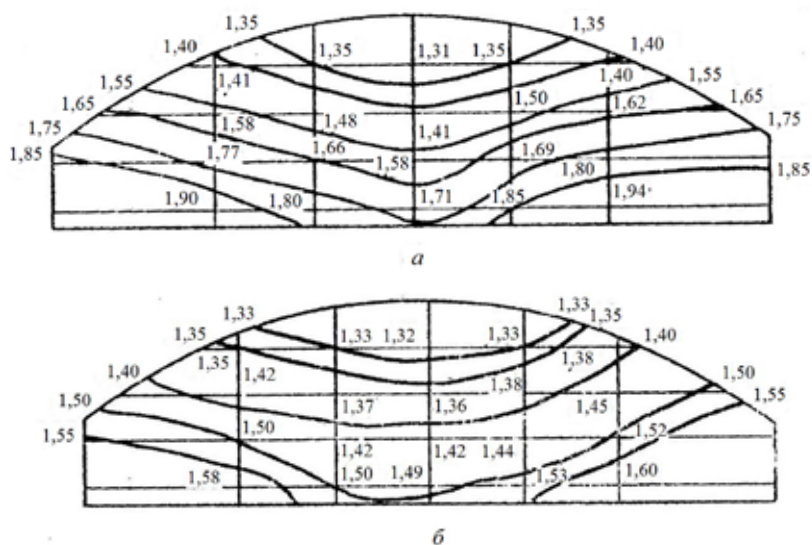


Рис. 18.97. Характер изменения коэффициентов расхода воздуха в пролете над перевальной стенкой при чистом (а) и заполненном (б) шлаковике

Изучение поля температур в пролете над перевальной стенкой показало (рис. 18.98), что средняя по сечению пролета температура дыма t_d довольно мало отличается от максимального и минимального значений (не более чем на 17-28 °С).

При различном заполнении шлаковика, но одинаковом тепловом режиме t_d оказалась примерно одинаковой (1465-1470 °С), хотя разность между максимальным и минимальным значениями температур снизилась с 50-55 до 35-40 °С. Максимальных значений температура дыма достигает вблизи свода во все периоды плавки. Коэффициент неравномерности поля температур K_t мало отличается от единицы (1,013-1,020) и остается практически постоянным при варьировании параметров теплового режима. Это позволяет судить о характере изменения температуры дыма по значениям локальной температуры, измеренной практически в любой точке сечения.

Таким образом, по данным локального замера в одной точке пролета над перевальной стенкой шлаковика можно определить как общий действительный расход дымовых газов, так и расход продуктов горения, приведенный к нормальным условиям (массовый расход).

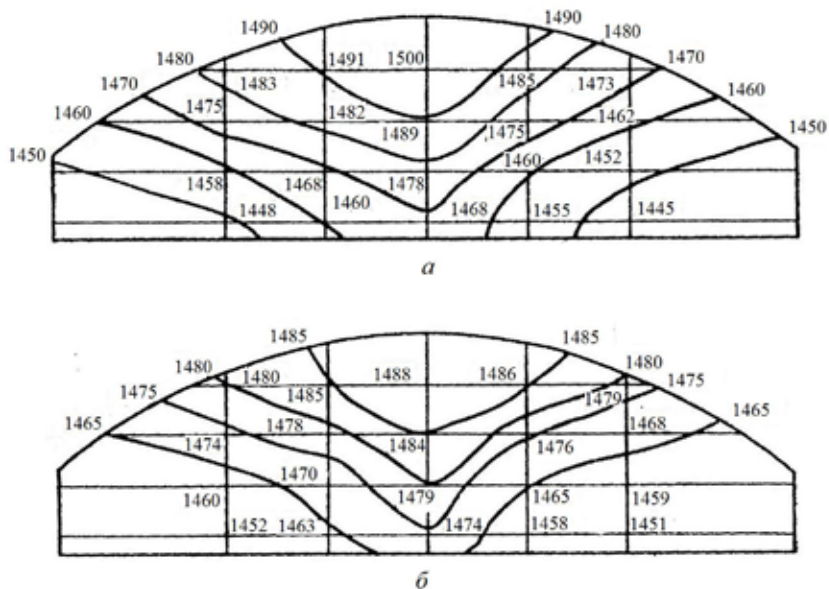


Рис. 18.98. Характер распределения температур (°C) в пролете над перевальной стенкой в период доводки при чистом (а) и заполненном (б) шлаковике ($BQ_H^p = 20$ МВт, $P_{св} = 19$ Н/м², $\alpha_{кл} = 1,21$, доля мазута по теплу 60 %)

Наиболее представительной для подобных замеров точкой является точка *A* (см. рис. 18.95), где скорости дыма имеют наибольшие значения, влияние подсосов воздуха минимально, а температура дыма мало отличается от средней температуры t_d .

По значениям скорости, температуры и составу продуктов горения в каждой точке можно подсчитать локальные значения теплосодержания дыма ($q_d = c_d t_d w_d + 30,2 \text{ СО } w_d$, здесь c_d – удельная теплоемкость дыма; СО – содержание СО в продуктах сгорания), и по полученным значениям q_d построить линии постоянных значений теплосодержания. Установлено, что коэффициент неравномерности поля теплосодержаний для точки *A* практически остается постоянным и не зависит от заполнения шлаковика. Это еще раз подтверждает возможность определения общего теплосодержания дыма $Q_d = \bar{q}_d F \cdot 3600$ по локальным замерам в одной точке пролета над перевальной стенкой шлаковика.

Поля температур концентрации отдельных компонентов и скоростей, а также теплосодержания дыма во многом зависят от гео-

метрических условий движения дымовых газов, обеспечивающих достаточно хорошее перемешивание газов. Поскольку эти условия для всех сталеплавильных печей мало отличаются, есть основания ожидать, что аналогичные особенности будут обнаруживаться и при исследовании других печей, в том числе работающих скрап-рудным процессом.

Оптимальные параметры теплового режима. Как известно, выплавка высоколегированных сталей требует особого режима ведения плавки. При этом заметим, что авторам в составе исследовательских коллективов приходилось проводить наладку тепловых режимов на сталеплавильных печах многих металлургических предприятий (ММК, НТМК, Верх-Исетский завод, металлургический завод им. А.К. Серова, Чусовской металлургический завод, Северский трубный завод, Уралвагонзавод, Челябинский завод, завод им. Октябрьской революции и др.).

Остановимся в качестве примера на проведении теплотехнических работ на сталеплавильных печах, особенностью которых была выплавка особой высококачественной стали. Печь была переведена на магнезито-хромитовый плоский подвесной свод.

При плавках высоколегированных сталей применялся усиленный нагрев металла в период доводки (по измерениям вольфрам-молибденовыми термopарами погружения до 1690-1720 °).

Повышение температурного режима являлось главным средством улучшения качества металла и технико-экономических показателей работы печей. Поэтому для повышения тепловой экономичности печей и стабилизации их тепловой работы после перевода на основные своды оказалось необходимым установить наиболее рациональные параметры теплового режима и улучшить качество сжигания топлива.

На рис. 18.99 представлены графики изменения текущих параметров плавки. Как видим, особенностью является специфика проведения доводки плавки.

Доводку плавки по величине тепловой нагрузки можно разделить на три периода. В начале доводки (во время наводки шлака) значительное форсирование теплового режима позволяет улучшить процессы шлакообразования и ускорить переход вредных примесей из металла в шлак.

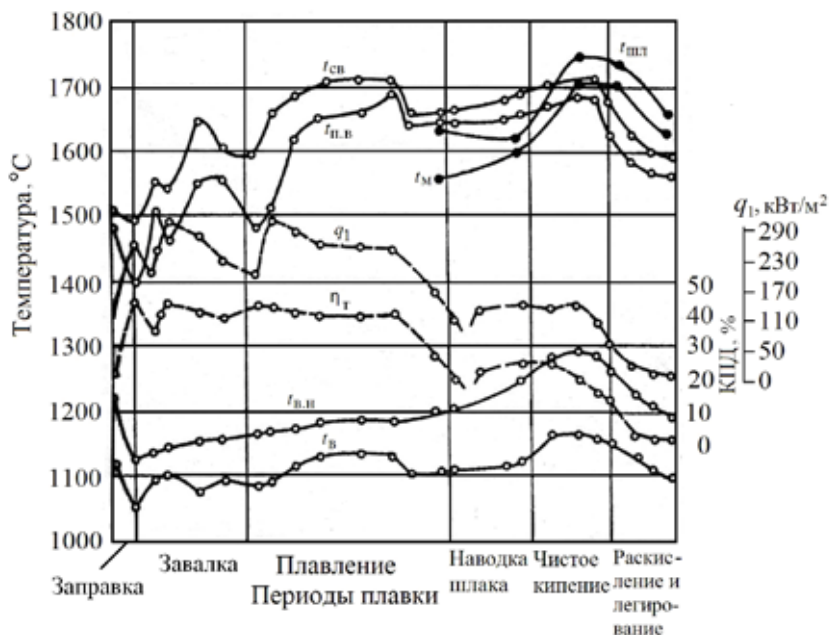


Рис. 18.99. Изменение теплопоглощения ванной (q_l), КПД печи (η_T), температуры свода ($t_{св}$), поверхности ванны ($t_{п.в}$), верха насадок ($t_{в.н}$), продуктов горения ($t_{п.г}$), температуры воздуха для горения ($t_{в}$), шлака ($t_{шл}$) и металла ($t_{м}$) по ходу плавки высоколегированной стали

В середине доводки (чистое кипение) при росте расхода топлива выше 1150–1250 кг/ч теплопоглощение не увеличивается. Но вследствие необходимости высокого нагрева металла при выплавке высоколегированной стали в этот период поддерживают максимальную тепловую нагрузку.

В конце доводки (раскисление и легирование) применяют тепловую нагрузку холостого хода.

Наличие зависимостей типа представленных на рис. 18.91 по определению температур отходящих продуктов сгорания и подогрева воздуха для горения давало возможность оперативно корректировать тепловой режим плавки (при конструктивных или технологических изменениях) для работы с максимальным теплопоглощением и КПД печи. При наличии соответствующих суммирующих и запоминающих устройств такое корректирование выполняется автоматически.

Суммарное теплопоглощение по поверхности ванны (полезно затраченную теплоту) Q_1 определяется из уравнений теплового баланса рабочего пространства печи:

$$Q_1 = BQ_H^p (1 - q_3) + Q_B + Q_{CO} - Q_2 - Q_5, \quad (18.271)$$

а тепловой КПД по формуле

$$\eta_T = \frac{Q_1}{BQ_H^p} = \frac{q_1 F}{BQ_H^p}, \quad (18.272)$$

где BQ_H^p – тепловая нагрузка печи; q_3 – химическая неполнота горения в доли теплоты сгорания топлива Q_H^p ; Q_B – физическое тепло воздуха; Q_2 – теплота продуктов горения; Q_{CO} – теплота от догорания CO, выделяющейся из ванны; Q_5 – потеря теплоты рабочим пространством; q_1 – удельное теплопоглощение; F – площадь пода.

На 70-т сталеплавильной печи при выплавке высококачественной стали и достижении температуры стали до 1720 °С при расчете теплопоглощения ванны учитывали определенные потери вентиляторного воздуха, подсос холодного воздуха в рабочее пространство, химический недожог топлива. Потери тепла рабочим пространством определяли для пустой печи (по холостому ходу).

Непрерывное определение всех величин, необходимых для расчета теплопоглощения ванны (см. формулу 18.271), позволило пользоваться при определении теплопоглощения средними величинами за любой промежуток времени и по тепловой диаграмме с достаточной степенью точности подсчитывать теплопоглощенное ванной за всю плавку (или за отдельный период).

Так было установлено, что тепловая нагрузка, отвечающая максимальному теплопоглощению ванны, составляет 16,3-17,4 МВт (14-15 млн. ккал/ч), понижаясь в период чистого кипения до 12 МВт (10,3 млн. ккал/ч). Наибольшее теплопоглощение ванны и тепловой КПД получали при давлении под сводом 1,6-1,8 Н/м² (1,6-1,8 мм вод.ст.) и коэффициенте избытка воздуха 1,20-1,25 (см. рис. 18.100).

Применение на сталеплавильной печи усовершенствованного теплового режима, характеризующегося оптимальными значениями тепловой нагрузки регулированием тяги и повышенным расходом вентиляторного воздуха, при неизменной производительности

печи приводило к уменьшению расхода топлива на 15-20 % (вследствие повышения КПД печи), а также обеспечивало возможности требуемого увеличения производительности печи.

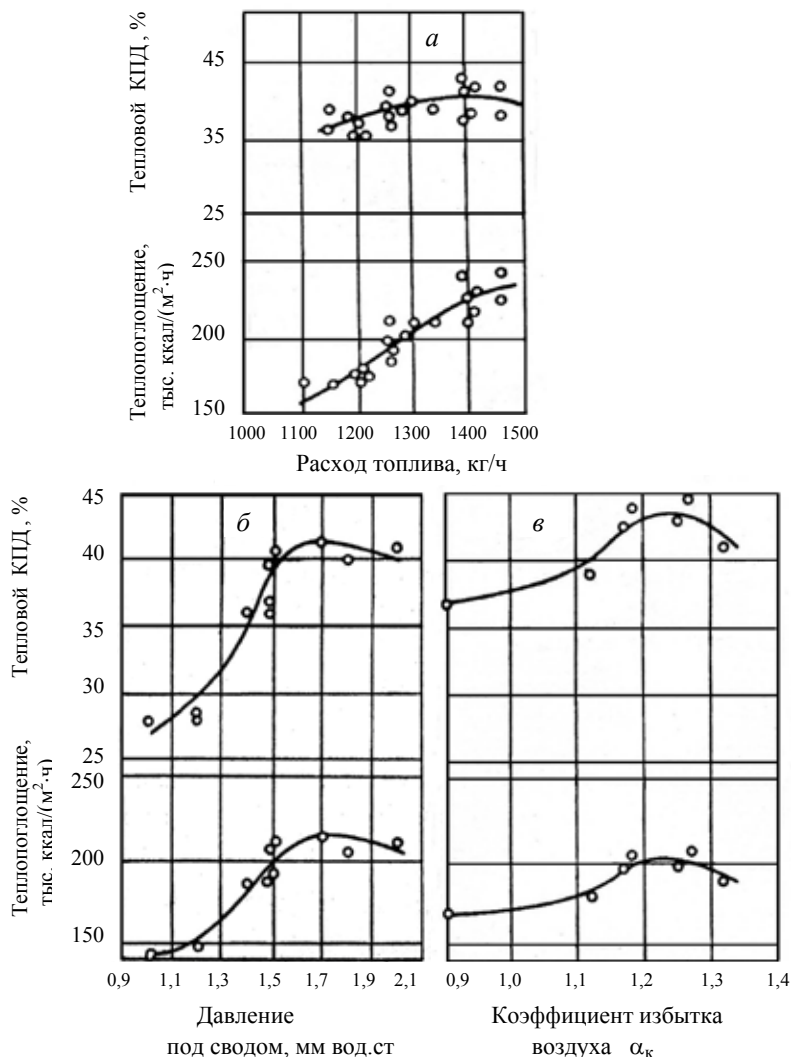


Рис. 18.100. Зависимость теплопоглощения ванны и теплового КПД печи от тепловой нагрузки (расхода топлива) (*a*), давления под сводом (*б*) и коэффициента избытка воздуха на клапане $\alpha_{\text{кл}}$ (*в*) для 70-т сталеплавильной печи, 1 тыс. ккал/м²·ч = 1,163 тыс. Вт/м², 1 мм вод.ст = 1 Н/м²

Управление факелом сталеплавильной печи. Данная разработка выполнена при участии В. Г. Лисиенко в НИИ металлургической теплотехники-ВНИИТМ, авторы В.К. Карпушин и Б.Н. Курочкин [18.213].

Был известен способ отопления сталеплавильной печи, включающей сжигание с помощью горелки природного газа и мазута, распыленного газовым потоком, и регулирование по ходу плавки тепловой нагрузки за счет изменения расхода природного газа, при котором при изменении расхода мазута, изменяют расход распылителя, поддерживая при этом заданное весовое соотношение.

Однако такой способ не обеспечивал построенного уровня кинетической энергии факела по ходу плавки, что не способствовало ускорению процессов нагрева и плавления.

Для устранения указанного недостатка был предложен способ, по которому поддерживают постоянной сумму весовых расходов распылителя и природного газа путем регулирования расхода распылителя.

Предлагаемый способ может быть осуществлен, например, следующим образом.

Сталеплавильную печь отапливают газомазутной горелкой с применением сжатого воздуха в качестве распылителя мазута. Тепловую нагрузку печи изменяют по периодам плавки, так, в периоды завалки и прогрева её поддерживают на максимальном уровне, абсолютная величина которой зависит от продолжительности этих периодов. В плавление и доводку тепловую нагрузку снижают. Изменяют тепловую нагрузку за счет изменения расходов мазута и природного газа. При этом кинетическую энергию факела по ходу плавки поддерживают на постоянном уровне, что обеспечивается благодаря регулированию расхода распылителя с тем, чтобы сумма весовых расходов природного газа и распылителя была постоянной. Расход распылителя при этом регулируется в автоматическом режиме.

Этот способ может быть применен также, например, в дуговых электропечах для поддержания постоянства параметров топливного факела по ходу плавки.

18.6.5. Диагностика процесса плавления в дуговой электрической печи с использованием металлизированных окатышей

Одним из перспективных направлений развития черной металлургии является применение металлизированных ванадийсодержащих

окатышей, при котором резко увеличивается использование ванадия. УралНИИЧМ совместно с Уральским политехническим институтом (УрФУ) разработали основные положения выплавки стали с использованием ванадийсодержащих металлизированных окатышей в зависимости от типа сталеплавильного агрегата. В частности, промышленная отработка режимов плавки сталей различных классов была проведена в электродуговых печах садкой 100 т.

При этом установлено, что технико-экономические показатели процесса (продолжительность, расход энергии, выход жидкой стали) находятся на уровне серийной технологии, а в ряде случаев, например при выплавке стали в электродуговых печах, улучшаются. Одной из главных проблем при выплавке сталей с использованием ванадийсодержащих окатышей является выработка рациональных режимов ведения плавки. Существенную помощь в решении указанной задачи может оказать математическое моделирование.

Были отработаны математические модели внешнего теплообмена в дуговых сталеплавильных печах [18.2; 18.23; 18.214-18.216], созданные на основе зонального метода и соответствующие периоду полного расплавления основной части шихты. В качестве ядра соответствующего модели использовался специально разработанный алгоритм расчета коэффициентов радиационного обмена для системы трехмерной геометрии, описываемой набором стандартных фигур. На основе разработанного вычислительного алгоритма построена математическая модель теплообмена излучением в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи, позволяющая с учетом реальной геометрии определять результирующий поток излучения на тепловоспринимающую поверхность ванны в зависимости от соотношения температур участвующих в теплообмене сред и тел.

Разработанные математические модели предложены для любых процессов в дуговых электрических печах. При этом удалось учитывать не только параметры внешнего, но и параметры внутреннего теплообмена. В проведении данной работы с активным участием авторов следует отметить большой вклад С.Г. Братчикова, В.В. Волкова, И.И. Игнатова, Б.Ш. Статникова, В.Н. Шимова.

Анализ внешнего теплообмена

Для оценки теплообменных процессов протекания плавки металлизированных окатышей в дуговых сталеплавильных печах

(ДСП) необходимо было знать изменение во времени плотности тепловых потоков на поверхность ванны от электрической дуги, печных ограждений и электродов. С этой целью на основе зональной методики [18.1] разработана математическая модель теплообмена (см. рис. 18.101), позволяющая с учетом реальной геометрии определить результирующий поток излучения на тепловоспринимающей поверхности ванны в зависимости от соотношения температур, участвующих в теплообмене тел и сред. С целью сопряжения внешней и внутренней задач теплообмена из внешней задачи предварительно получена зависимость плотности теплового потока на ванну (зона б) от температуры ее поверхности при фиксированных значениях температуры остальных поверхностных зон и объема поглощающего газа.

При расчете внешнего теплообмена использованы также электрические и геометрические параметры дуги постоянного тока, полученные на основе канальной модели процессов в ее столбце. Уравнение баланса мощности столба дуги было представлено в виде

$$IEl_{\Sigma} = 2\pi r_{\text{эф}} \varepsilon \sigma_0 (T_d^4 - T^4) l_0 + 2\pi r_{\text{эф}} l_{\text{ш}} \alpha_d (T_d - T). \quad (18.273)$$

Здесь I – ток дуги, А; E – напряженность электрического поля столба дуги, В/м; l_{Σ} – длина дуги, м; ε – степень черноты дуги; σ_0 – константа излучения абсолютно черного тела; $l_{\text{ш}}$ и l_0 – длина закрытой и открытой частей дуги, м; α_d – коэффициент конвективной теплоотдачи с закрытой части дуги, Вт/(м²·К); T_d – температура столба дуги, К; $r_{\text{эф}}$ – эффективный радиус столба дуги, м, определяемый из формулы

$$r_{\text{эф}} = \sqrt{\frac{I}{0,2545 \cdot 10^{-2} p^{1/2} u_{\text{эф}}^{2/3} \bar{a} g_e^{-1} E}}, \quad (18.274)$$

где p – давление газа, Па; g_e – рамзауровское сечение частиц (для железа $g_e = 35 \cdot 10^{-20}$, м²; \bar{a} – отношение статистических весов иона и атома газа (для железа $\bar{a}^2 = 12/5$).

О коэффициенте теплоотдачи дуги α_d в литературе не имеется достаточных данных. Для его определения использованы визуальные наблюдения, которые показали, что длина открытой части дуги при работе трансформатора мощностью 32 МВА ДСП-100 на десятой

ступени равна 0,15 м при толщине слоя шлака 0,1 м. В результате решения уравнения (18.273) получено значение α_d , равное 7200 Вт/(м²·К).

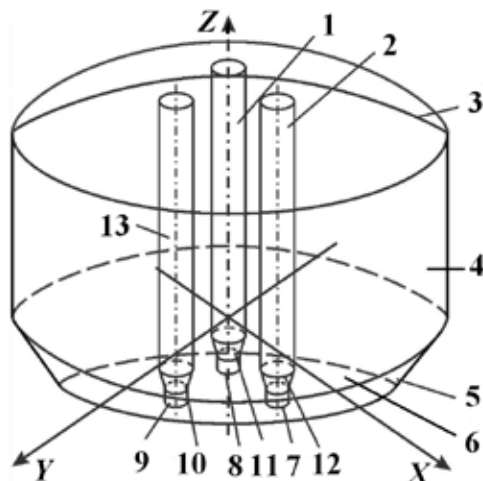


Рис. 18.101. Геометрическая модель рабочего пространства ДСП: 1, 2 – цилиндрическая часть электродов; 3 – свод; 4 – боковые стенки; 5 – откосы; 6 – зеркало расплава; 7–9 – электрические дуги; 10–12 – сферические поверхности концов электродов; 13 – электроды

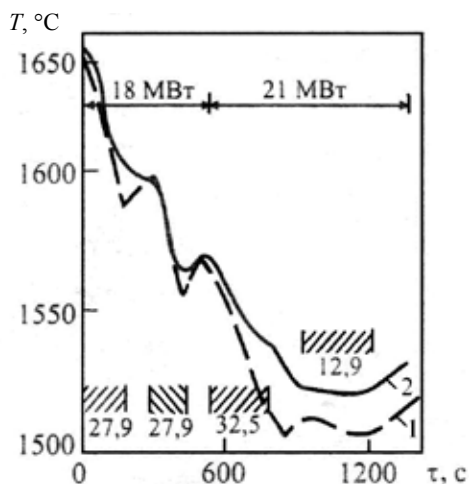


Рис. 18.102. Изменение температуры ДСП-100 во времени при загрузке металлизированных окатышей: 1 – расчет; 2 – эксперимент. Заштрихованные участки соответствуют периодам загрузки окатышей, цифрами указана скорость загрузки, кг/с

Результирующий радиационный поток на поверхность ванны (см. зона 6, рис. 18.101) рассчитывали по селективно-серой модели излучения с учетом разбиения спектра излучающих компонентов на z спектральных интервалов [18.1].

$$q_{\text{л}} = \sum_{i, i \neq M}^z A_{i6}^{\Sigma} T_i^4 - A_6^{\Sigma} T_6^4, \quad (18.275)$$

где A_{i6}^{Σ} и A_6^{Σ} – селективные коэффициенты радиационного обмена являются суммой вкладов в лучистый обмен отдельных спектральных интервалов:

$$A_{i6}^{\Sigma} = \sigma_0 \sum_{k=1}^z f_{i6}^{\lambda_k} \varepsilon_6^{\lambda_k} \alpha_i^{\lambda_k}; \quad A_6^{\Sigma} = \sigma_0 \sum_{k=1}^z (1 - f_{i6}^{\lambda_k}) \varepsilon_6^{\lambda_k} \alpha_6^{\lambda_k}, \quad (18.276)$$

где $f_{i6}^{\lambda_k}$ – разрешающий коэффициент излучения от зоны 6 на зону i для k -го интервала спектра; $\varepsilon_6^{\lambda_k}$ – спектральная степень черноты поверхности металла; $\alpha_6^{\lambda_k}$ – доля полусферической интегральной поверхностной плотности потока излучения абсолютно черного тела, испускаемого для k -го интервала спектра.

Накопление банка данных коэффициентов радиационного обмена для различной геометрии системы, что при определенной конструкции печи соответствует изменению размеров дуги (степени мощности трансформатора), позволило использовать уравнение (18.275) для определения общего теплового потока и результирующего мгновенного значения мощности, приходящей на металл от внешнего источника.

Разработанный алгоритм расчета внешнего и внутреннего теплообмена в ДСП при плавке металлизированных окатышей был реализован на ЭВМ. Была оценена адекватность предложенной модели теплообмена и разработанной на ее основе методике расчета. Сравнение результатов замера температуры ванны ДСП-100 термопарой непрерывного действия в период загрузки окатышей и результатов для аналогичных технологических и энергетических режимов приведено на рис. 18.102, откуда видно, что расчетные и экспериментальные данные имеют достаточно хорошее качественное и удовлетворительное для инженерного анализа количественное совпадение результатов (см. также [18.2]).

Влияние скорости загрузки окатышей и относительное распределение мощности

Известно, что оптимальным с точки зрения производительности и энергозатрат является режим загрузки металлургических окатышей в печь, когда не происходит остывания ванны и обеспечивается быстрое проплавление материала. В связи с этим был выполнен анализ влияния скорости загрузки ν окатышей в ДСП-100 на характер изменения температуры расплавленного металла T и изменения мгновенных значений отдельных статей энергозатрат. Из рис. 18.103 видно, что с ростом скорости загрузки окатышей от 4 до 17 кг/с (33-100 кг/МВт·мин падающего теплового потока) температура ванны (кривая I) в конце пятой минуты будет изменяться от 1583 до 1530 °С ($T_{\text{нач}} = 1570$ °С, $M_{\text{нач}} = 85$ т), т. е. ванна может как нагреваться, так и остывать.

Температура и теплосодержание ванны $\Delta = (M_{\text{нач}} + \nu t c_B^T) dT/dt$ могут считаться характерными, как видно из кривых I и VIII при значении $\nu = 7,5$ кг/с или 50 кг/МВт (падающего теплового потока) в мин. Рост скорости загрузки окатышей в печь приводит к росту абсолютных значений всех статей энергозатрат (кривая III – мощность плавления окатышей $q_{\text{пл}}$, кривая IV – мощность нагрева окатышей $q_{\text{н}}$ и т. д.), кроме мощности тепловых потерь через подину $q_{\text{пот}}$ (кривая V), что объясняется более высоким падением температуры расплава по сравнению с падением температуры поверхности подины, укрытой металлом. При недостатке мощности, подводимой от внешнего источника $q_{\text{вн.ис}}$ к расплаву, недостаток энергии, необходимой на протекание теплофизических и физико-химических процессов, как видно из кривой VIII, компенсируется за счет собственного тепла металла и шлака, что вызывает остывание ванны.

Рассмотрено также относительное распределение мощности между отдельными статьями затрат. С этой целью ниже приведены данные для условий, реализуемых при $\nu = 7$ кг/с, т. е. при медленном прогреве ванны (в числителе значения в МВт, в знаменателе – в %).

$\tau, \text{с}$	$q_{\text{вн.ис}}$	$q_{\text{н}}$	$q_{\text{пл}}$	$q_{\text{пот}}$	$q_{\text{сл}}$	$q_{\text{с}} + q_{\text{со}}$
60	9,406/100	3,026/32,171	3,095/32,905	0,111/0,180	1,220/12,970	1,472/15,649
300	9,309/100	3,018/32,420	3,104/33,344	0,112/1,203	1,205/12,944	1,464/15,727
600	9,210/100	3,009/32,671	3,113/33,800	0,114/1,238	1,185/12,866	1,455/15,798

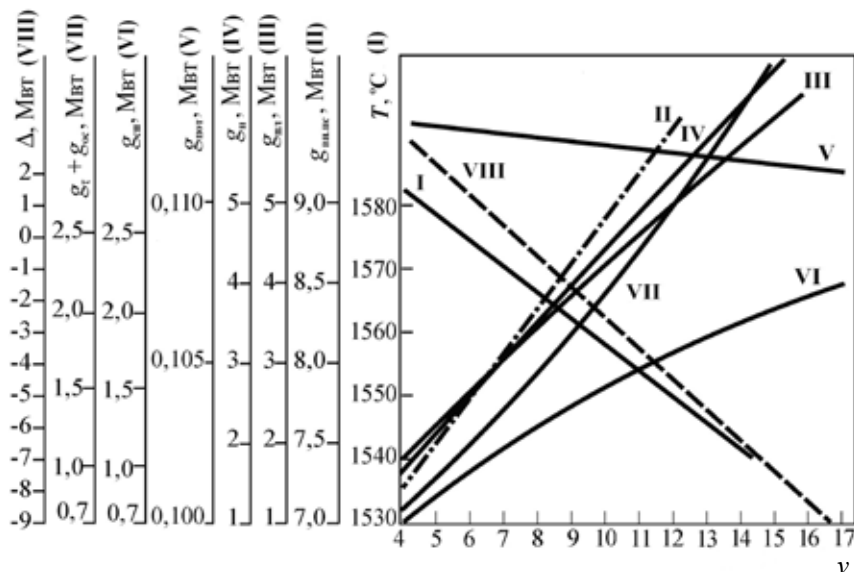


Рис. 18.103. Зависимость изменения температуры расплава в ванне ДСП-100 и мгновенных значений статей энергозатрат (в конце пятой минуты) от скорости загрузки v

Как видно, основная часть подводимой энергии расходуется на нагрев и расплавление окатышей (около 66 %). Догрев образующегося расплава до собственной температуры ванны обуславливает потребление еще примерно 13 % энергии ($q_{\text{сл}}$). Значительная часть подводимой мощности, порядка 15-16 %, расходуется в связи с протеканием реакции восстановления остаточных и содержащихся в шлаке оксидов железа углеродом окатышей и выделением оксида углерода в газовую среду ($q_x + q_{\text{CO}}$). Немногим более 1 % подводимой энергии расходуется на компенсацию тепловых потерь через под печи. Остальные 4 % собственно и являются источником повышения теплосодержания ванны.

Расчет параметров дуги

Расчет параметров дуги, выполненный для электрического режима плавки ДСП-100 с трансформатором мощностью 32 МВА при толщине шлака 0,1 м, которая соответствует существующим технологическим условиям восстановительного периода, показал, что с повышением ступени напряжения печного трансформатора от XVI

до II увеличиваются радиус дуги $r_{\text{эф}}$ с 0,054 до 0,058 м и длина ее открытой части l_0 с 0,063 до 0,25 м. Результаты расчета геометрических размеров дуги ДСП-100 следующие ($l_{\text{ш}}$ – погружение в шлак):

Степень напряжения трансформатора	l_0 , м	$r_{\text{эф}}$, м	l_0 , м	$r_{\text{эф}}$, м
	$l_{\text{ш}} = 0,1$ м		$l_{\text{ш}} = 0,2$ м	
II	0,252	0,068	0,152	0,077
IV	0,230	0,068	0,130	0,070
VIII	0,178	0,066	0,078	0,077
XII	0,119	0,060	0,019	0,073
XVI	0,063	0,054	-	-

Такое соотношение параметров дуг приводит к тому, что даже при работе на ступени X за счет прямой (конвективной) теплоотдачи металл получает всего порядка 4,7 МВт при общей полезной мощности 11,7 МВт. Из 7,0 МВт, отдаваемых дугой радиационным путем, на металл падает около 0,8 МВт, остальная подводимая энергия является источником перегрева футеровки. Действительно, результаты расчета показали, что в то время, как удельный лучистый тепловой поток на поверхность металла при $T = 1570$ °С составляет около 33 кВт/м², то на свод и боковые стены он достигает величины более 47 кВт/м² при температуре внутренней поверхности кладки 1500 °С.

Из сказанного становится очевидным, почему в практике стремятся к максимальному экранированию дуги. В этом отношении применение металлизированных окатышей имеет существенное преимущество. Вспенивание шлака при активном выделении СО обеспечивает дополнительное экранирование дуги, повышая тем самым площадь прямого (конвективного) теплообмена. При этом, как видно из вышеприведенных данных, площадь контакта возрастает не только в силу увеличения толщины шлака, но и роста радиуса дуги. В результате мощность, передаваемая от дуги к ванне, увеличивается до 10,6 МВт.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать математическое описание теплофизических процессов, происходящих при плавке металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи. Сопоставление расчетных и экспериментальных

данных об изменении температуры ванны ДСП-100 при плавке окатышей в ЭСПЦ Череповецкого металлургического завода показали адекватность предлагаемой модели реальному объекту. Это позволяет применять разработанную программу расчета на ЭВМ для аналитического исследования энергетических особенностей процесса и поиска оптимального режима плавки металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи.

Усовершенствованный вариант математической модели и использование ванадийсодержащих окатышей

Разработанный вариант математической модели плавления в ДСП органически сочетал расчеты внешнего теплообмена, описанные ранее и расчеты внутреннего теплообмена.

В основу математической модели для исследования внутреннего теплообмена был положен программный модуль и методика расчета [18.2; 18.215; 18.216], которые были предназначены для моделирования периода расплавления стального лома в дуговой сталеплавильной печи. При этом следует отметить активное участие И.И. Игнатова. Программа реализует следующие основные процедуры: вычисление результирующих тепловых потоков для пространственно замкнутой излучающей системы, решение уравнений теплопроводности для элементов футеровки, решение трехмерного уравнения теплопроводности в шихте, перенос расплавленной шихты вниз и распределение ее по горизонтали, определение плотности шихты в зависимости от номера слоя, а также коэффициента теплопроводности шихты в зависимости от температуры в данной точке и от плотности и другие процедуры. Коэффициент теплопроводности стального лома рассчитывался как эффективный с учетом излучения в порах по формуле

$$\lambda_{\text{ш}}^{\text{нас}} = \lambda_{\text{м}} \rho_{\text{м}} / \rho_{\text{ж}} + (1 - \rho_{\text{м}} / \rho_{\text{ж}})(\alpha \delta + 4\epsilon \sigma_0 T^3) \quad \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad (18.277)$$

где $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности куска шихты, Вт/(м·К);

$\rho_{\text{м}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ – плотности загрузки шихты и жидкого металла, кг/м³;

α – коэффициент конвективного теплообмена в порах шихты, Вт/(м² · К);

δ – средний размер куска шихты, м; ϵ – степень черноты шихты;

T – температура, К.

Кроме того, программа предусматривает возможность изменения подводимой мощности и подвалки шихтовых материалов с первоначально заданными свойствами согласно графику ведения процесса.

С целью учета особенностей технологии плавления ванадийсодержащих окатышей в программу введены следующие усовершенствования. Прежде всего введены дополнительные логические операторы, позволяющие идентифицировать процесс подвалки окатышей в процессе плавления (см. рис. 18.104) [18.2]. В случае подвалки металлизированных окатышей переопределяются теплофизические свойства нерасплавленного материала. Вводится условие-ограничение, что окатыши подваливаются только на жидкую ванну (нерасплавленный остаток при этом равен 0,05). Основные изменения в программе сделаны в процедуре расчета эффективной теплопроводности шихты. В случае нагрева и плавления окатышей логические операторы обеспечивают вычисление эффективной теплопроводности слоя окатышей по формуле А.С. Невского и В.М. Абзалова, которая получена экспериментальным путем при исследовании эффективной теплопроводности слоя окатышей

$$\lambda_{\text{ок}}^{\text{эф}} = \frac{1}{\frac{1 - P_{\text{ок}}}{\lambda_{\text{м}}} + \frac{P_{\text{ок}}}{2,35d\sigma_0 T^3 + 0,0061/d}} \quad \text{Вт/(м·К)}, \quad (18.278)$$

где $P_{\text{ок}}$ – порозность слоя окатышей диаметром d .

Для проверки адекватности усовершенствованной математической модели с учетом плавки окатышей были использованы экспериментальные данные плавки с использованием металлизированных ванадийсодержащих окатышей на 100-т дуговой сталеплавильной печи, полученные УралНИИЧМ. Технология выплавки стали в опытных плавках была следующей. На первом этапе (в завалку) в печь загружался металлический лом. В период плавления поддерживалась максимальная подводимая мощность. Подвалка металлизированных окатышей проводилась в конце периода расплавления металлического лома. Исходя из концентрации ванадия, количество окатышей должно составлять 23-27 % от общего веса металлошихты. За основу была взята опытная плавка, в которой начальная завалка лома составляла 75 т. После расплавления основной части

металлического лома производилась порционная подвалка 25 т металлизованных окатышей (4; 8,5; 4,5; 4,5 и 3,5 т). Подвалка окатышей проводилась по мере их расплавления. Согласно опытным данным, продолжительность периода расплавления составила 2 ч 47 мин (с учетом горячих простоев). Расход электроэнергии в период расплавления составил 50,25 МВт×ч.

Результаты расчета периода расплавления опытной плавки с подвалкой ванадийсодержащих металлизованных окатышей приведены на рис. 18.105, *а*.

Согласно данным опытной плавки, подвалка окатышей проводилась на жидкую ванну. При этом в момент подвалки средняя температура металла снижалась на 323–403 К в зависимости от массы подваливаемых окатышей. Расплавление окатышей начинается с верхних слоев, где их температура превышает среднюю величину на 473–873 К. При длительности периода расплавления, равной 2 ч 47 мин, затраты энергии на расплавление металлошихты и окатышей составили 48,93 МВт×ч, что отличается от опытных данных, согласно тепловому балансу, на 12 %. Данный результат с учетом того обстоятельства, что никакой предварительной подгонки параметров модели не проводилось, и с учетом ограниченной точности промышленного эксперимента можно считать положительным, а математическую модель периода расплавления с подвалкой металлизованных окатышей – пригодной для поэтапного теплового расчета технологического процесса расплавления в дуговой сталеплавильной печи.

В качестве примера использования усовершенствованной математической модели приведен расчет другого варианта плавки 75 т металлического лома с единовременной подвалкой 25 т металлизованных окатышей при максимальной подводимой мощности в печь. Результаты расчета приведены на рис. 18.105, *б*. Как показывают результаты расчета, время процесса расплавления составило 1 ч 35 мин, затраты энергии равнялись 39,7 МВт×ч, конечная температура металла составила 1799 К. Массивная разовая подвалка окатышей оказывает существенное влияние на ход плавки. После подвалки окатышей средняя температура зеркала ванны снижается на 923 К, а средняя температура металла снижается на 493 К. После того, как произведена подвалка, начинается прогрев и плавление окатышей, причем нижние слои окатышей прогреваются значительно медленнее до температуры плавления, чем верхние.

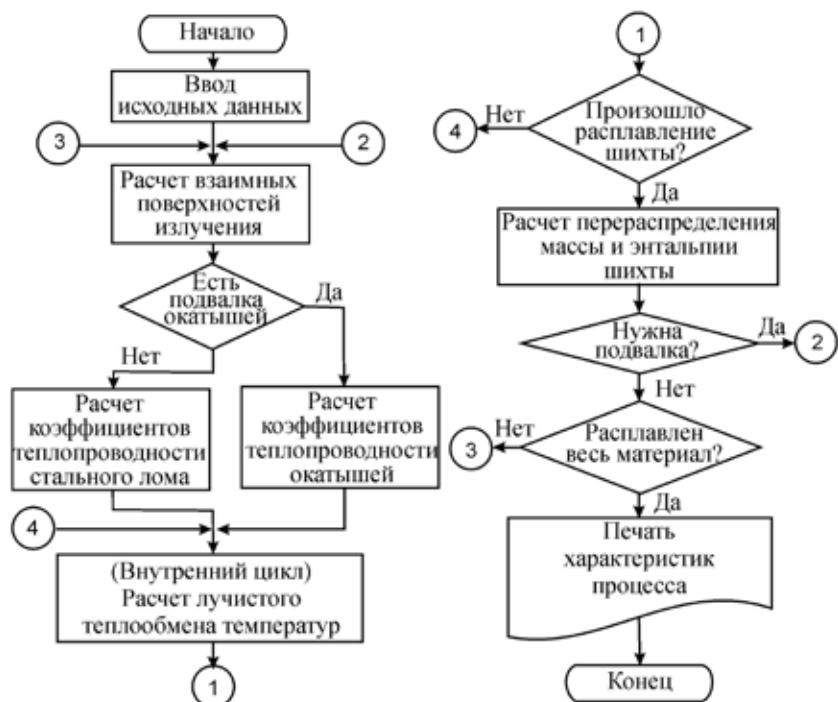


Рис. 18.104. Укрупненная блок-схема программы расчета расплавления шихты в дуговой электропечи с подвалкой окатышей.

Цифры в кружках — последовательность операций

Сравнение двух рассчитанных вариантов периода расплавления 75 т металлического лома с подвалкой 25 т металлizedованных окатышей показывает, что в случае разовой подвалки 25 т окатышей затраты энергии на расплавление всей массы шихты на 18 % меньше, чем при распределенной подвалке окатышей. Таким образом, разовая подвалка всей массы металлizedованных окатышей оказывается выгоднее, чем распределенная по времени подвалка той же массы окатышей.

В результате введенных в программный модуль изменений были расширены возможности математической модели дуговой сталеплавильной печи, которые позволяют рассчитывать процесс периода расплавления с изменяющимися теплофизическими свойствами

ми шихтовых материалов. Эти изменения позволяют моделировать процесс расплавления металлошихты с подвалкой металлизированных окатышей на жидкую ванну и проводить расширенную диагностику процессов, в том числе при использовании металлизированных окатышей.

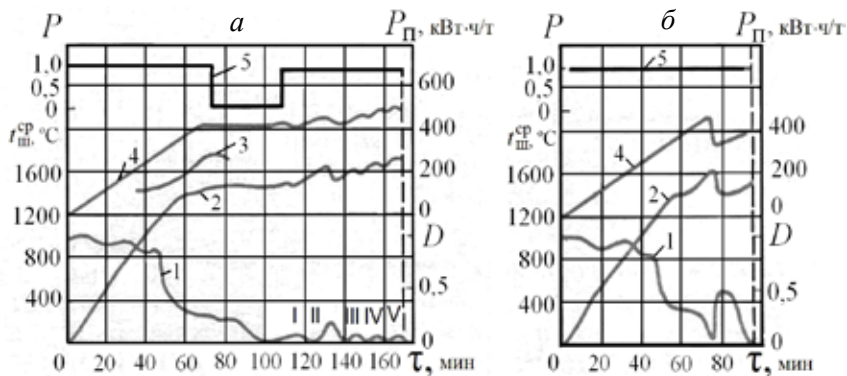


Рис. 18.105. График периода расплавления 75т стального лома с подвалкой 25т металлизированных окатышей:

a – порционная подвалка окатышей (I–V – соответственно 4,0; 8,5; 4,5; 4,5; 3,5 т); b – разовая подвалка 25 т окатышей; 1 – доля D нерасплавленного металла по ходу плавки; 2 – средняя температура шихты $t_{ш}^{cp}$, °C; 3 – максимальная температура зеркала ванны, °C; 4 – подведено энергии P с начала плавки, кВт·ч/т; 5 – график мощности P

18.6.6. Автоматизированная обработка при разливке металла

Авторский вклад

В процессе научной и учебной деятельности авторы постоянно уделяли внимание вопросам, связанным с непрерывной разливкой металла (машинами непрерывного литья заготовок – МНЛЗ), в частности, с проблемами математического моделирования и автоматизации.

По инициативе В. Г. Лисиенко, раздел, связанный с непрерывной разливкой, был им написан и вошел в пионерское учебное пособие «Теплофизика металлургических процессов» [18.15].

Плодотворной была работа совместно с Ю.А. Самойловичем по изданию учебного пособия «Теплотехнические основы технологии и конструирования машин непрерывного литья заготовок» [18.217].

Далее В. Г. Лисиенко были представлены материалы, связанные с непрерывной разливкой в ряде справочных изданий (под редакцией В. Г. Лисиенко) [18.20-18.24; 18.215].

В читаемом учебном курсе по автоматизации технологических процессов вопросы непрерывной разливки находили свое отражение.

В недавней НИР, связанной с информационными и автоматическими проблемами в сталеплавильном производстве (применительно в основном к комбинату «Северсталь» г. Череповца), автором написан раздел, связанный с моделированием и автоматизацией МНЛЗ.

В данной главе представлены в очень сокращенном виде лишь некоторые вопросы, в решении которых В. Г. Лисиенко принимал непосредственное участие как руководитель или консультант аспирантских и докторских работ.

Также вопросы непрерывной скоростной разливки алюминия представлены в авторской разработке (с аспирантом А.Г. Бабенко) в п. 18.7.

Структура АСУ агрегата вакуумной обработки металла

В разработке и реализации данной системы на Магнитогорском металлургическом комбинате (ММК) принимал участие аспирант С.В. Хомлев (научный руководитель В. Г. Лисиенко). В. Г. Лисиенко давал некоторые консультации и посещал на ММК (г. Магнитогорск) комплекс конвертерного цеха, в который и входит рассматриваемый вакууматор. Отметим лишь некоторые особенности АСУ вакууматора [18.218], особенностью которого было всемерное использование именно отечественных разработок и аппаратуры.

При этом отмечалось, что сложность, технологическая насыщенность современного производства, повышенные требования к механическим, химическим и другим свойствам выпускаемого металла, а также необходимость постоянного контроля качества продукции на каждом этапе производства заставляют современные предприятия уделять большое внимание использованию вычислительной техники и соответствующему программному обеспечению в системах управления качеством продукции.

Поэтому в рамках проходившей на ОАО «ММК» реконструкции производства была проведена модернизация АСУ ТП агрегата вакуумной обработки стали кислородно-конвертерного цеха.

Была предложена и реализована трехуровневая структура АСУ ТП, которая обеспечивала широкие возможности функционирования автоматизированной системы управления, делала систему более надежной и живучей, создавала предпосылки для повышения эффективности технологического процесса и обеспечения гарантированного качества продукции.

Нижний уровень АСУ ТП составляют локальные САР с заложенными в них линейными динамическими моделями, обеспечивающие сбор данных и стабилизацию важнейших параметров технологического процесса в технологических зонах вакууматора. Технически они реализованы на базе микропроцессорных контроллеров.

Второй уровень управления реализован на базе промышленных ЭВМ MicroPC фирмы «Oclagon» под управлением операционной системы реального времени QNX. На этом уровне реализованы модели реального времени, позволяющие в режиме реального времени выполнять основные функции АСУ ТП: визуализацию, оценивание, идентификацию и оптимизацию режимов технологического процесса с помощью настроек параметров локальных САР.

Третий уровень АСУ ТП разработан для текущей идентификации параметров модели реального времени и экспертной системы, для уточнения оптимальных траекторий и динамики управления, для реализации полной математической модели взаимодействия агрегатов в конвертерном цехе.

Программный модуль автоматизированной системы контроля положения разливочного узла установки сверхбыстрой закалки

В промышленности все более широкое применение находят аморфные сплавы, полученные быстрой закалкой. Это вызвано их уникальными, механическими, химическими, магнитными свойствами. Для получения аморфной металлической ленты используются, например, установки типа «Сириус», разработанные в Институте ВНИИМЕТМАШ. Процесс получения ленты заключается в разливке расплавленного металла из узкой щели – сопла на быстровращающийся барабан-холодильник. При этом скорость схода готовой ленты составляет 25-35 м/с. Толщина ленты по технологическим требованиям не должна превышать 20-30 мм.

Для решения важной задачи формирования необходимого управляющего воздействия в рамках управления технологическим про-

цессом была разработана автоматизированная система контроля (АСК) положения разливочного узла [18.219]. В состав АСК входят: модуль аналогового ввода, адаптер для подключения этого модуля к компьютеру, IBM совместимый компьютер. Для АСК разработан программный модуль, позволяющий получать оперативную информацию о величине технологического зазора в виде графического изображения на терминале и накапливать ее в ходе процесса разлива. Полученный таким образом файл данных используется для создания математической модели процесса разлива и для формирования закона управления положением разливочного узла в автоматическом режиме. На основании выполненных в ходе экспериментов расчетов скорректирован алгоритм, по которому изменяется положение разливочного узла при выпуске серийной продукции.

Многофункциональный прибор для оценки температуры и расхода расплава плавильной печи

Данная работа выполнялась под руководством Л.Г. Доросинского с участием В. Г. Лисиенко, В.Н. Круглова, С.В. Поршнева и др. [18.220].

По результатам данных работ получена так называемая β -версия прибора для оценки температуры и дебита струи расплава. β -версия включает в себя комплект видеодатчиков для съема изображений струи расплава и рабочую станцию со специализированным программным обеспечением, осуществляющим обработку получаемых кадров и взаимодействие с пользователем.

Разработанная система оценки дебита струи расплава плавильной печи предназначена для использования на металлургических предприятиях. Проведенные испытания системы показали достаточную надежность и точность определения температуры струи, ее диаметра и скорости истечения, на которых рассчитываются мгновенный и интегральный расходы металла. Разработанный пакет прикладных программ SARCS-system, реализующий основные алгоритмы предварительной обработки изображений, может быть использован в самых различных областях науки и техники: металлургической, горной, фармацевтической, строительной, лесной промышленности и т. п., для проектирования систем технического зрения, контролирующих производственный процесс. Разработанный алгоритм совмещения изображений, основанный на принципе

развязки двумерного движения на два одномерных, позволил достичь быстродействия при совмещении двумерных изображений с измеримым со скоростью работы одномерного дифференциального алгоритма, сохранив при этом двумерную рабочую область и субпиксельную точность совмещения видеокадров. Такой алгоритм востребован при разработке высокоскоростных систем оценки перемещения контролируемого объекта. Созданный комплекс практических и лабораторных работ по программированию алгоритмов обработки многомерных массивов данных в среде CUDA на графическом адаптере может служить основой для лабораторного практикума студентов всех форм обучения по курсу «Цифровая обработка сигналов».

18.7. Управление, контроль и диагностика применительно к плавильным агрегатам цветной металлургии

18.7.1. Контроль и управление в процессах вакуумного дугового переплава

Работы в этой области проводились в связи с тесным сотрудничеством В. Г. Лисиенко и ряда сотрудников с ВСМПО, на котором цех вакуумного дугового переплава является важнейшим звеном в дальнейшем производстве высококачественной продукции на базе титанов и сплавов с титаном. Представленные разработки являются оригинальными, их применение обеспечивает дальнейшее усовершенствование системы автоматизации плавкой на предприятии.

Резонансный метод управления

Метод разработан НПО ФАН с участием В. Г. Лисиенко и сотрудников ВСМПО [18.23; 18.221].

Вакуумные дуговые печи (ВДП) широко используются в промышленности для производства чистых металлов и сплавов. Несмотря на то, что метод электродугового переплава металлов используется давно, исследования дугового разряда интенсивно продолжаются, но тем не менее до настоящего времени не разработана до конца теория электрической дуги и не найдены надежные способы контроля параметров по строго функциональным и физически обоснованным зависимостям.

К основным параметрам необходимо отнести силу электрического тока, падение напряжения на дуге, длину межэлектродного промежутка, весовую скорость плавки, уровень заполнения кристаллизатора расплавом, напряженность магнитного поля соленоида. Особую важность имеет выявление причин образования боковой дуги и своевременный контроль взрывоопасной ситуации при производстве химически активных металлов. Из указанных параметров надежно контролируются только сила тока, напряжение на дуге, напряженность магнитного поля. Остальные параметры контролируются по случайным, статистическим моделям или вообще не контролируются, несмотря на то, что они в значительной степени влияют на структуру (качество) металла, расход электроэнергии и безопасность работы ВДП. Без точного знания всех параметров невозможно настроить печь на оптимальный режим работы и, более того, создать конструкцию высокоэффективных печей нового поколения с учетом методов современной физики.

Глубокий вакуум и высокая температура внутри печей не позволяют использовать внедренные в печь датчики и приборы для контроля уровня расплава, весовой скорости плавки, межэлектродного расстояния, образования боковой дуги. Отсутствие стабильных сигналов этих параметров не позволяет разработать надежные системы автоматического управления процессом плавки. Более того, при работе печей все параметры связаны между собой и, следовательно, каждый из выделенных объектов регулирования будет вносить возмущение в «соседний» канал управления.

В данном параграфе представлены материалы по новому оригинальному резонансному методу управления работой ВДП.

На рис. 18.106 показана упрощенная схема вакуумной дуговой печи и измерительного устройства. Можно представить, что ВДП представляет собой коаксиальный резонатор с переменным сечением внешнего проводника. Теория и устройство коаксиальных резонаторов хорошо разработаны и широко применяются в области СВЧ, связи и локации, для получения информации о технологических параметрах с целью автоматизации технологических процессов.

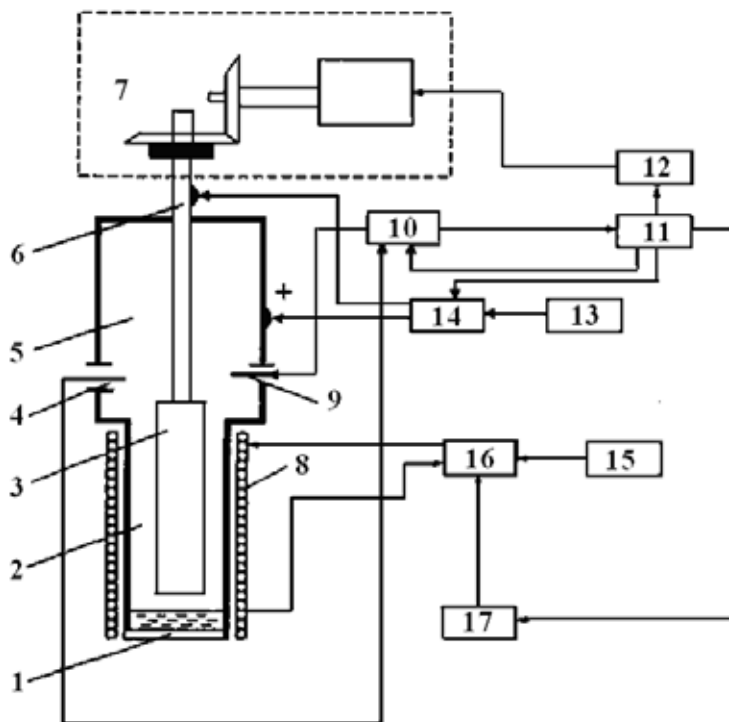


Рис. 18.106. Вакуумная печь и блок-схема автоматического управления параметрами работы ВДП:

1 – поддон; 2 – кристаллизатор; 3 – расплавляемый электрод; 4 и 9 – штыри, расположенные в пучности электрического поля резонатора; 5 – вакуумная камера; 6 – электродержатель; 7 – механизм подачи расплавляемого электрода; 8 – соленоид; 10 – электронная часть генератора; 11 – электронный блок с программным обеспечением, подключены к блоку управления; 12, 13 – блок питания дугового разряда; 14 – блок управления током дугового разряда при выведении усадочной раковины; 15 – блок питания соленоида; 16 и 17 – блоки управления и модуляции тока соленоида

На рис. 18.107 представлена схема коаксиального резонатора с переменным сечением внешнего проводника, а на рис. 18.108 – распределение тока и напряжения высокой частоты (ВЧ) в резонаторе. Электрическая дуга включена в разрыв между торцом внутрен-

него проводника (расплавляемого электрода) и дном (поддоном печи) внешнего проводника и представляет собой генератор высокочастотного электромагнитного шума в широком спектре частот. Сами резонаторы, как первичные датчики, обладают для этого необходимыми свойствами: высокой добротностью Q на резонансной частоте, изменением резонансной частоты Δf_p от изменения длины резонатора, волновым сопротивлением r . Численно добротность резонатора определяется отношением реактивной запасенной энергии W_p к мощности потерь $P_{\text{сп.п}}$:

$$Q = \frac{\sqrt{4\pi f_p \mu_0 \sigma} \int_V H^2 dV}{\int_S |H_{\text{TM}}|^2 dS} \approx \frac{2V}{Sd}, \quad (18.279)$$

где H – амплитуда магнитного вектора в объем резонатора; H_{TM} – компонента смещения магнитного вектора, касательная к поверхности резонатора; V – объем резонатора; d – толщина скин-слоя; S – внутренняя площадь резонатора; μ_0 – магнитная постоянная; σ – проводимость внутренних стенок резонатора.

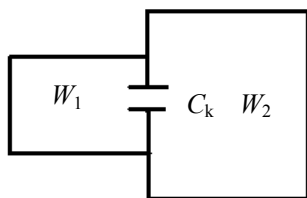
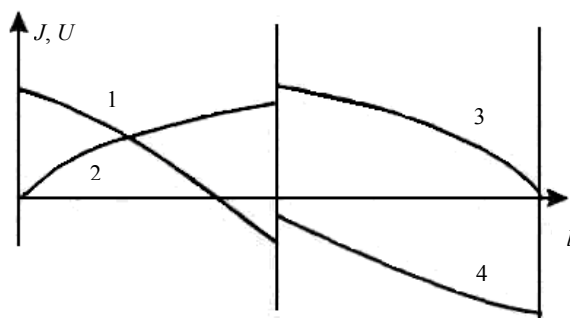


Рис. 18.107. Схема коаксиального резонатора с переменным сечением внешнего проводника. W_1 и W_2 – волновые сопротивления кристаллизатора и вакуумной камеры, соответственно, C_k – эквивалентная электрическая емкость коаксиального резонатора ВДП

Рис. 18.108.
Распределение тока J и напряжения U высокой частоты по длине l резонатора – ВДП,
1, 4 – распределение тока J ;
2, 3 – распределение напряжения U



При производстве металлов, например, титана, используются ВДП с медными кристаллизаторами различных размеров. Расчетное значение добротности резонатора-ВДП с длиной кристаллизатора 400 см, диаметром 100 см и длиной расплавляемого электрода 400 см и диаметром 80 см составляет порядка $3 \cdot 10^3$ на частоте 30 МГц. Измеренные значения добротности Q варьируют в пределах 200-300 и это уменьшение Q связано с загрязнением внутренних стенок резонатора в процессе плавки электрода. Рассмотрен кристаллизатор с электродом, как четвертьволновой отрезок. В этом случае резонансная длина волны λ равна $4l$, где l – длина кристаллизатора, и резонансная частота $f_{\text{рез}} = c/(4l)$, где c – скорость света в пространстве. Нижняя частота диапазона резонатора будет равна около 16 МГц, а при заполнении на $3/4$ кристаллизатора расплавом резонансная частота составит 55 МГц.

В этом случае коэффициент преобразования

$$k_1 = \frac{f_{\text{нижн}} - f_{\text{верх}}}{300} = \frac{36 \text{ МГц}}{300 \text{ см}} = 130 \text{ кГц/см.} \quad (18.280)$$

Полоса пропускания на уровне 0,7 резонансной кривой на частоте 19 МГц при добротности 300 составит $\Delta f = f_{\text{рез}}/Q = 43 \text{ кГц}$ и на частоте 55 МГц – $\Delta f = 120 \text{ кГц}$. Относительное изменение частоты резонатора $\Delta f = 10^{-5}$ при изменении температуры кристаллизатора на 100 °С.

В процессе плавки радиусы кристаллизатора $R_{\text{кр}}$ и электрода $R_{\text{эл}}$ практически не изменяются в пределах погрешности измерений 1 %. Следовательно, остаются постоянными площади поперечного сечения: $\pi R_{\text{кр}}^2 = \pi R_{\text{эл}}^2$. Можно считать, что объем и масса части расплавляемого электрода будут равны объему и массе расплавленного металла в кристаллизаторе:

$$\pi R_{\text{кр}}^2 \Delta h_{\text{кр}} = \pi R_{\text{эл}}^2 \Delta h_{\text{эл}}, \quad (18.281)$$

где $\Delta h_{\text{кр}}$ и $\Delta h_{\text{эл}}$ – изменение высоты электрода и расплава в кристаллизаторе, соответственно.

Так как изменение объемов и массы за единицу времени остаются равными при постоянстве $R_{\text{кр}}$ и $R_{\text{эл}}$ в процессе плавки, то изменение высоты $\Delta h_{\text{кр}}$ и $\Delta h_{\text{эл}}$ находятся между собой в соотношении:

$$\frac{\Delta h_{\text{эл}}}{\Delta h_{\text{кр}}} = \frac{R_{\text{кр}}^2}{R_{\text{эл}}^2} \quad \text{или} \quad \Delta h_{\text{эл}} = \frac{R_{\text{кр}}^2}{R_{\text{эл}}^2} \Delta h_{\text{кр}}. \quad (18.282)$$

По технологии устанавливают определенный межэлектродный промежуток l , который должен поддерживаться постоянным в процессе плавки всего расходуемого электрода. Так как всегда выполняется условие $R_{\text{эл}} < R_{\text{кр}}$, то изменение высоты расплава в кристаллизаторе будет меньше изменения высоты расплавляемого электрода $\Delta h_{\text{эл}}$. Для поддержания постоянства межэлектродного расстояния l необходимо чтобы выполнялось условие:

$$\Delta h_{\text{эл}} = \left(\frac{R_{\text{кр}}^2}{R_{\text{эл}}^2} - 1 \right) \Delta h_{\text{кр}}, \quad (18.283)$$

где $\Delta h_{\text{кр}}$ пропорционально изменению резонансной частоты $f_{\text{рез}}$ коаксиального резонатора, т. е. $\Delta h_{\text{кр}} = k \Delta f_{\text{рез}}$, где k – коэффициент пропорциональности, см/Гц.

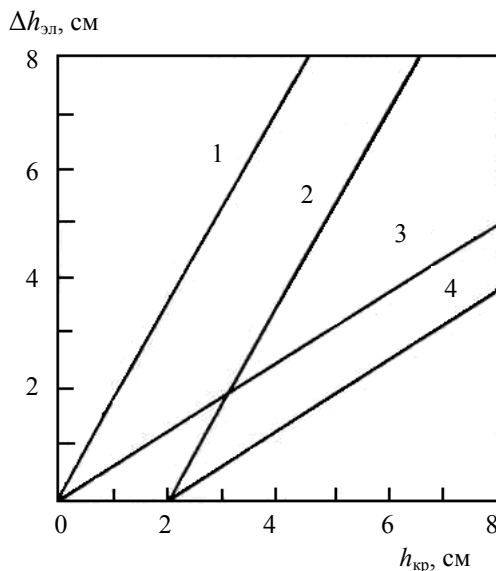


Рис. 18.109. Зависимость изменения длины электрода $\Delta h_{\text{эл}}$ от уровня заполнения кристаллизатора расплавом $h_{\text{кр}}$:

1, 2 – зависимость при $R_{\text{кр}} / R_{\text{эл}} = 2$; 3, 4 – при $R_{\text{кр}} / R_{\text{эл}} = 1,25$;

2, 4 – зависимости при постоянном межэлектродном расстоянии 2 см

На рис. 18.109 приведены зависимости $\Delta h_{\text{эл}}$ от изменения уровня расплава $\Delta h_{\text{кр}}$ в кристаллизаторе. Линии 1, 2 получены для случая $R_{\text{эл}} = 25$ см, $R_{\text{кр}} = 50$ см, а 3, 4 – для $R_{\text{эл}} = 40$ см и $R_{\text{кр}} = 50$ см. Зависимости 2, 4 показывают изменения $\Delta h_{\text{эл}}$ при постоянном межэлектродном расстоянии, равном 2 см. Резонансная частота $f_{\text{рез}}$ может быть измерена в любой момент времени с точностью 10^{-5} . Зависимость частоты резонатора от уровня заполнения кристаллизатора расплавом (линия 1) и после электронного блока линейаризации (линия 2) показаны на рис. 18.110.

По графикам (см. рис. 18.110) определяются значения уровня заполнения кристаллизатора расплавом, межэлектродный промежуток и весовую скорость плавки по формуле:

$$2\pi R^2 P_{\text{уд}} \frac{kd h_{\text{кр}}}{dt} = \frac{dP}{dt}, \quad (18.284)$$

где $P_{\text{уд}}$ – плотность переплавляемого металла; P – масса жидкой ванны.

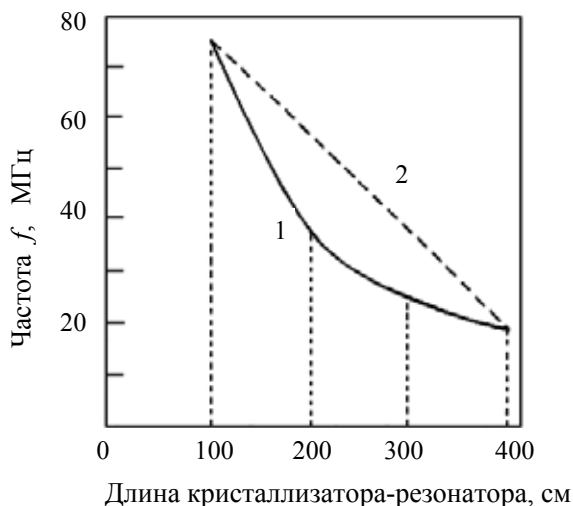


Рис. 18.110. Зависимость частоты коаксиального резонатора-ВДП от уровня заполнения кристаллизатора расплавом: 1 – изменение частоты f самого резонатора; 2 – изменение частоты на входе электронного блока линейаризации

Задача определения межэлектродного расстояния и весовой скорости плавки требует точной информации о геометрических раз-

мерах кристаллизатора и расплавляемого электрода. Рассмотрен частный случай, когда кристаллизатор является усеченным конусом с малым радиусом $r_{кр}$ и большим радиусом $R_{кр}$, а расплавляемый электрод-цилиндр, в этом случае

$$\pi R_{эл}^2 h_{эл} = \frac{1}{3} \pi R_{кр}^2 (R_{кр}^2 + R_{кр} r_{кр} + r_{кр}^2). \quad (18.284)$$

При решении уравнения (18.284) относительно $R_{кр}$, получено:

$$R_{кр} = \left(\frac{3R_{эл} h_{эл} r_{кр}^2}{R_{эл} h_{эл} - \Delta r_{кр}^2} - \frac{3}{4} r_{кр}^2 \right) - \frac{r_{кр}}{2}. \quad (18.285)$$

Для примера приняты указанные выше размеры: радиус кристаллизатора 50 см, радиус электрода 40 см, длина электрода 400 см. По формуле (18.285) получили $R_{кр} = 500,82$ мм.

Предлагаемый радиочастотный способ на основе коаксиального резонатора повышает требования к технологической подготовке печи к плавке. Однако эти требования могут быть легко выполнены в производственных условиях.

Эффективные способы контроля основных параметров работы ВДП необходимы для получения слитка с однородной структурой по всему объему, безопасности работы и снижения потребления электроэнергии. Управление параметрами работы ВДП в процессе плавки рекомендовано осуществлять системой автоматического регулирования, блок-схема которой показана на рис. 18.106.

Кроме того, резонансная система позволяет резко увеличить эффективность влияния электромагнитных полей на параметры работы ВДП и качество слитков.

Способ «коаксиального резонатора» обеспечивает повышение качества (улучшает структуру) металла за счет более точного контроля соотношения весовой скорости плавки и скорости кристаллизации расплава. Мощные высокочастотные поля в резонаторе уменьшают влияние адсорбционной влаги на образование «корки» и «короны» и, следовательно, на загрязнение слитка. Влияние вихревых токов и электронного резонанса приводит к главному управлению процессом плавки изменением прикатодного падения напряже-

ния, что важно при выведении усадочной раковины и уменьшении электропотребления.

18.7.2. Управление процессом вакуумного дугового переплава

Производство титана вакуумно-дуговым способом плавления придает все новые требования к повышению качества выхода годного продукта. Было предложено более детально изучить период плавления и на современной элементной базе разработать адаптивную систему управления по параметрам частоты капельных замыканий ($F_{к.з}$) и падения напряжения на плазме дуги (U_d).

Данные разработки выполнены аспирантом, а ныне кандидатом техн. наук А.Ю. Ташкиновым под руководством В. Г. Лисиенко*.

А.Ю. Ташкинов в свое время являлся сотрудником ВСМПО и выполнял работы в плане усовершенствования методов контроля и автоматического управления процессом вакуумного дугового переплава (ВДП) [18.23; 18.222-18.224].

Моделирование и оценка параметров дуги в печи ВДП

Объектом исследования являлась вакуумная дуговая печь типа ДТВ8,7-Г10 с возможностью плавки титановых слитков диаметром 770 мм жаропрочных сплавов стали диаметром слитков 485 мм. Основными элементами печи являются кристаллизатор с поддоном, герметично соединенный с вакуумной камерой.

Была разработана на основе промышленного эксперимента математическая регрессионная модель, описывающая падение напряжения между ванной жидкого металла и торцом плавящегося электрода в зависимости от параметров межэлектродного промежутка и силы тока дуги. Проведена оценка скорости движения катодных на поверхности плавящегося электрода. Расчетным путем оценен радиус катодного пятна для плотностей токов $10^{-9} - 10^{-10}$ А/м².

* Ташкинов А.Ю. Разработка математических моделей и алгоритмов и их применение для исследования и усовершенствования процессов вакуумного дугового переплава: автореф. на соискание ученой степени канд.техн.наук /А.Ю. Ташкинов. – Екатеринбург, 2003. – 21 с.

Рассмотрено влияние параметров ВДП тока дуги I_d , межэлектродного зазора L_d и давления в камере печи P . Чтобы оценить величину межэлектродного промежутка был проведен следующий промышленный эксперимент: изучили реакцию падения напряжения на дуге и частоту капельных замыканий на изменение межэлектродного промежутка и тока печи при постоянном давлении в камере печи. Промышленный эксперимент состоял в переплаве в вакуумной дуговой печи электрода диаметром 705 мм в слиток диаметром 770 мм титанового сплава ВТ6. Параметры процесса изменяли в следующих пределах: силу тока от 7500-15000 А, межэлектродный промежуток от 0 мм до 160 мм, давление в печи поддерживали постоянным 9-15 мкм рт.ст.

В процессе эксперимента производили регистрацию падения напряжения на дуге, частоты капельных замыканий, перемещения электрода и глубины вакуума с использованием промышленного компьютера AWS-800 фирмы Advantech с частотой опроса 2 Гц. Сигнал от падения напряжения на дуге подавали на прибор выделения капельных замыканий, который после обработки сигнала выдавал импульсы определенной длительности и амплитуды в промышленный компьютер. Межэлектродный промежуток изменяли с постоянной скоростью $0,5 \pm 0,1$ мм/с. Каждый опыт продолжался по 10 мин, после чего работу печи в течении 10 мин стабилизировали и начинали следующее измерение. Моделирование производили с использованием методики регрессионного анализа, который выполняли на IBM PC совместимом компьютере с помощью пакета Statistica 5.0. использовали кривую систему сбора и обработки информации, позволяющей производить регистрацию параметров с частотой до 50 кГц с программным обеспечением POSM – пакетом обработки сигналов. На рис. 18.112 представлена структурная схема системы регистрации параметров плавки. Данные напряжения на дуге, частоты капельных замыканий, перемещения штока, значение вакуума, после регистрации на промышленном компьютере AWS-800 и кривой системе приводили к общему времени и производили обработку.

Зависимость падения напряжения от межэлектродного промежутка L_d в диапазоне измерений от 0 до 160 мм аппроксимировали нелинейным уравнением:

$$U_d = A_u(I) + B_u(I) \times \ln(L_d) B, \quad (18.289)$$

где $A_u(I)$ и $B_u(I)$ – коэффициенты регрессионной модели, зависящие от тока дуги.

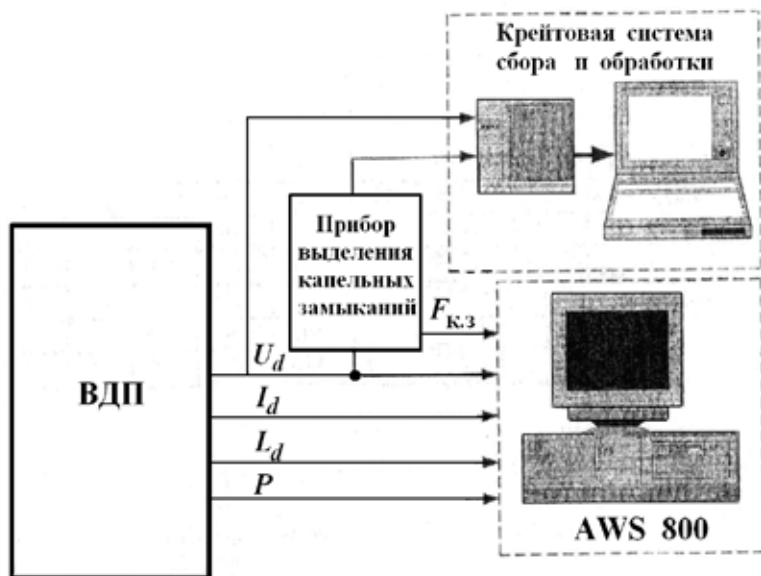


Рис. 18.112. Структурная схема системы регистрации параметров плавления

Проанализирован параметр частоты капельных замыканий в зависимости от межэлектродного промежутка. Было определено, что эта зависимость будет описываться следующим нелинейным уравнением:

$$F_{к.з.} = A_f(I) \cdot (L_d)^{B_f(I)} \text{ Гц}, \quad (18.290)$$

где $A_f(I)$, $B_f(I)$ – коэффициенты регрессионной модели, зависящие от тока дуги.

На рис. 18.113 и рис. 18.114 представлены полученные графики падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий в зависимости от изменения межэлектродного промежутка и силы тока дуги.

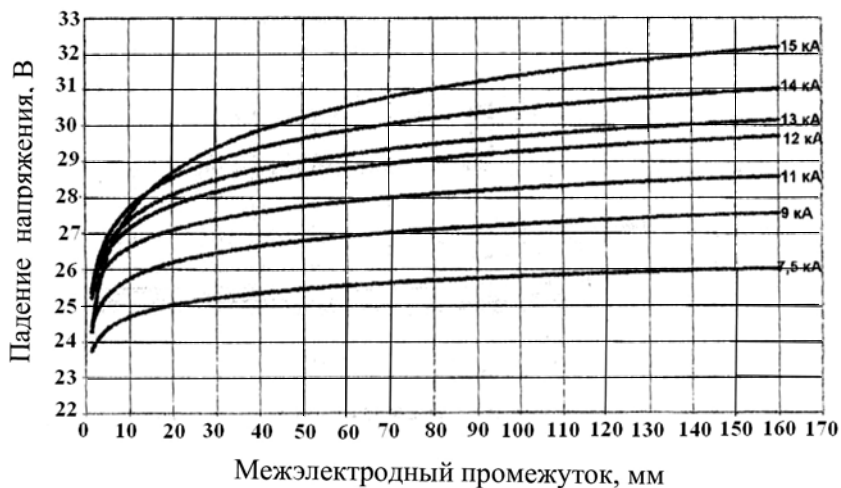


Рис. 18.113. Падение напряжения на дуге в зависимости от межэлектродного промежутка и силы тока дуги

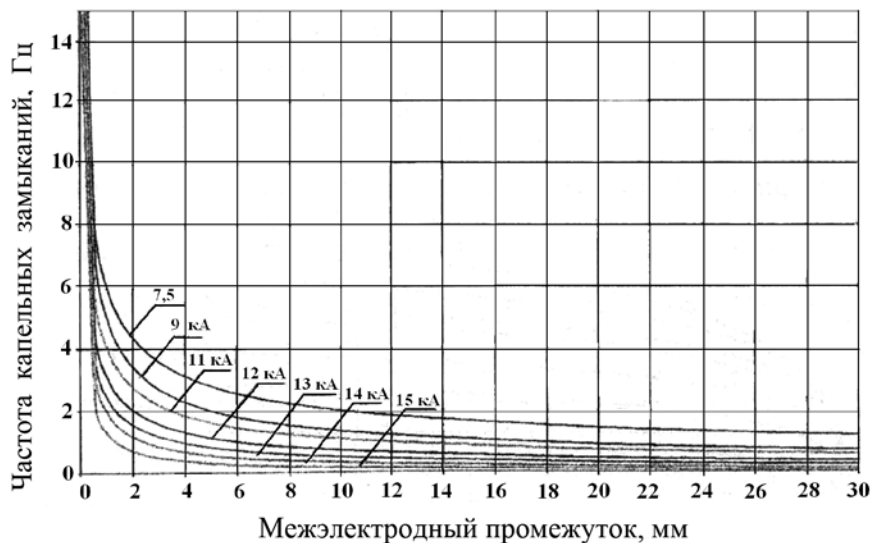


Рис. 18.114. Частота капельных замыканий в зависимости от межэлектродного промежутка и силы тока дуги

Проанализирована динамика изменения коэффициентов регрессионных моделей от силы тока дуги. Для каждого коэффициента $A_u(I)$, $B_u(I)$, $A_f(I)$, $B_f(I)$ были построены зависимости его изменения от силы тока дуги и предложены регрессионные модели. На рис. 18.115 показаны зависимости изменения коэффициентов от силы тока дуги.

По полученным зависимостям были предложены модели поведения коэффициентов предложенных моделей от силы тока.

Проведен анализ процесса капельного замыкания во время вакуумного дугового переплава. Было выделено два условно называемых типа режимов – тип *A* и тип *B*. Капельные замыкания типа *A* отличаются от типа *B* тем, что по окончании капельного замыкания напряжение восстанавливается до прежнего уровня, а при типе *B* напряжение увеличивается до уровня 50-100 В на время 1-10 микросекунд с дальнейшим восстановлением до прежнего уровня. Проанализирована динамика изменения падения на дуге во время ее горения на азотированные добавки. При горении дуги возникает резкое изменение электропроводности дуги со скоростью 105 В/с, что выражается в резком изменении падения напряжения (см. рис. 18.116).

При оценке близости межэлектродного промежутка (МП) к истинному значению суммы квадратов отклонений для моделей падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий во время плавки колебалось от 1,8-3,2 мм для МП = 10 мм и 7,7-12,7 мм для МП = 50 мм.

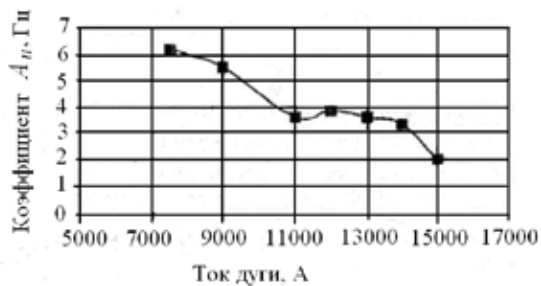
Для поддержания заданного значения межэлектродного промежутка по моделям падения напряжения и частоты капельных замыканий разработаны алгоритмы, позволяющие производить оценку и корректировку скорости движения электрода вниз.

На рис. 18.116 представлены блок-схемы алгоритмов управления движением электрода по предложенным моделям.

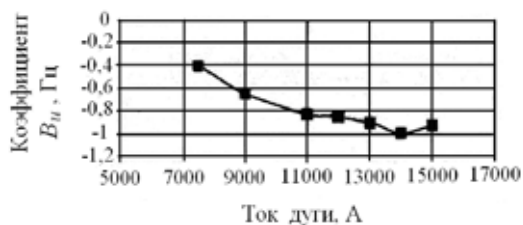
Дана оценка массы переплавляемого металла за время одного капельного замыкания. При этом использовано основное уравнение теплового баланса и количество подведенного тепла для его испарения.

$$m \cdot L_{\text{subl}} = \rho \cdot j^2 \cdot V \cdot \tau \text{ Дж}, \quad (18.291)$$

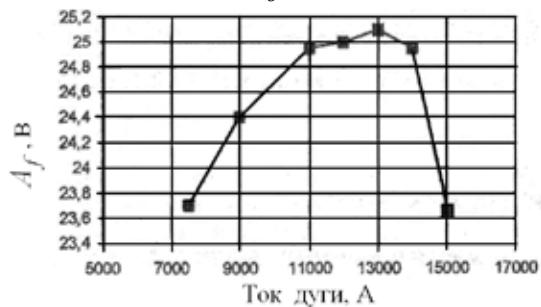
где m – масса испаряемого металла; L_{subl} – удельная теплота сублимации; ρ – удельная теплопроводность жидкого металла; j – плотность тока; V – объем металла; τ – длительность капельного замыкания.



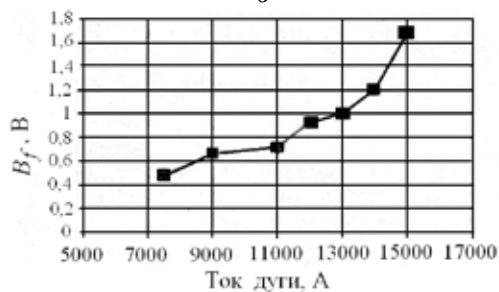
a



б



в



г

Рис. 18.115. Зависимость коэффициентов: A_u (а), B_u (б), A_f (в), B_f (г) от тока дуги

При силе тока, протекающего через расплавленный мостик металла, равной 20 кА и значениях межэлектродного промежутка порядка 10-30 мм получена приближенная оценка массы расплавленного мостика металла, которая лежит в пределах от 0,0005 кг до 0,002 кг для титановых сплавов.

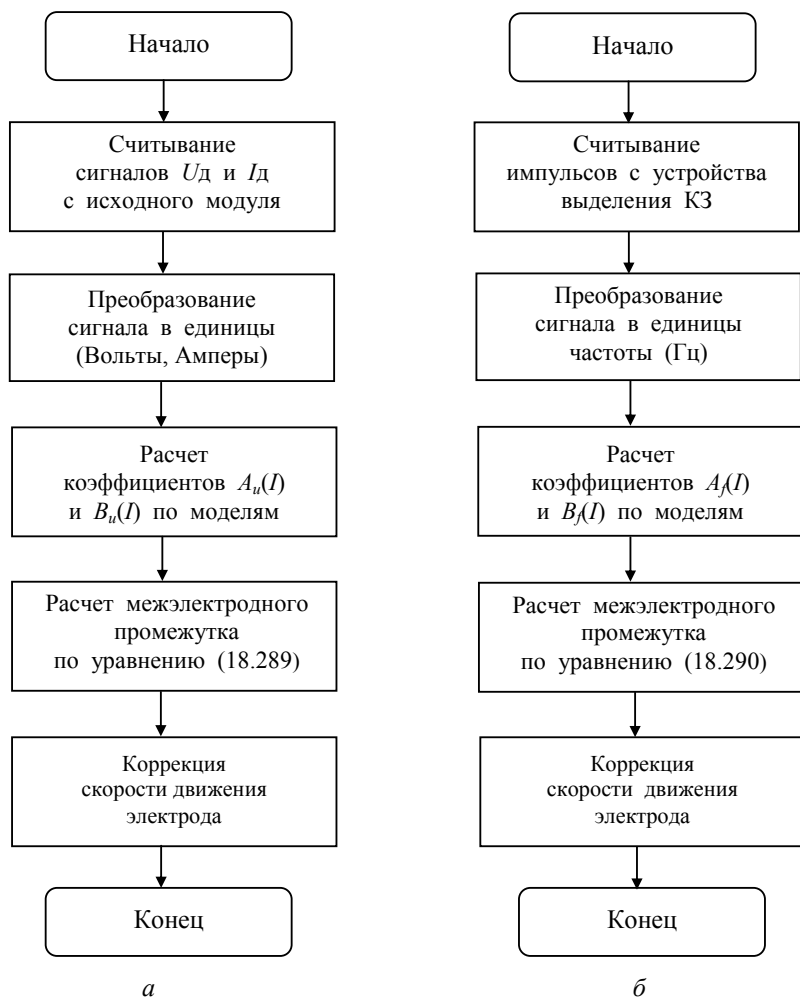


Рис. 18.116. Блок-схемы алгоритма оценки межэлектродного промежутка по модели падения напряжения на дуге (а) и по модели капельных замыканий (б)

Была разработана также математическая регрессионная модель процесса «ионизации» и произведена оценка длительности релаксационного процесса ионизации от изменения падения напряжения на дуге. На рис. 18.117 показана графическая модель процесса ионизации при вакуумном дуговом переплаве, в которой определены следующие параметры: среднее значение падения напряжения на дуге ($U_{\text{ср}}$) и частоты капельных замыканий ($F_{\text{к.з}}$) до ионизации, $T_{\text{с}}$ – длительность спада напряжения, $T_{\text{р}}$ – длительность релаксационного процесса, $U_{\text{мин}}$ – минимального значения напряжения, $U_{\text{разн}}$ – разность падений напряжения до ионизации $U_{\text{ср}}$ и её минимальным значением $U_{\text{мин}}$.

Проанализированы 15 различных случаев ионизаций, по которым предложена регрессионная модель

$$U_{\text{разн}} = A + B \times T_{\text{р}} \quad B,$$

где A и B – коэффициенты регрессионной модели. Получены коэффициент $A = 1,046$, $B = 0,0282$. Для предложенной модели коэффициент регрессии составляет 0,78.

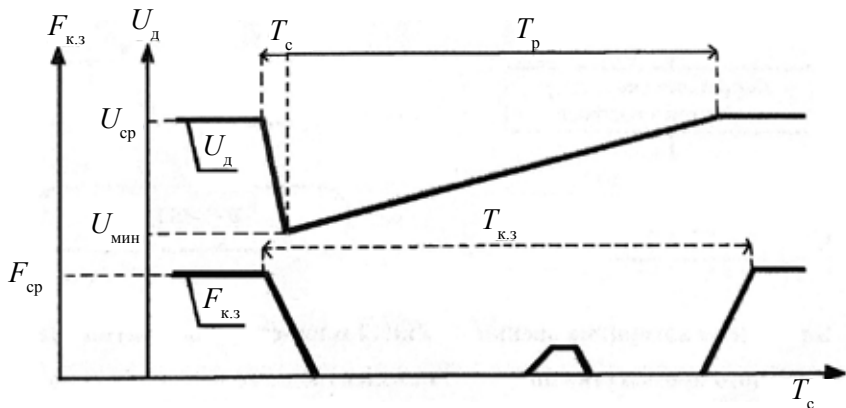


Рис. 18.117. Графическая модель падения напряжения на дуге $U_{\text{д}}$ и частоты капельных замыканий $F_{\text{к.з}}$ от времени при ионизации

При этом следует учитывать, что величина частоты капельных замыканий во время релаксационного процесса ионизации приближается к нулю, не превышая уровня 0,5–1,5 Гц. В то же время работа автоматизированных регулирующих систем вакуумного дугового

переплава основана, как правило, на параметрах падения напряжения и частоты капельных замыканий. При длительной (затяжной) ионизации, т. е. падении напряжения и отсутствии частоты капельных замыканий, возможно ухудшение работы автоматических регуляторов, что, как следствие, приводит к нестабильности плавки. В соответствии с полученными результатами можно четче учитывать явление ионизации и с учетом полученной модели более уверенно управлять процессом плавления.

Также была рассмотрена математическая модель, описывающая теплообмен в течение всего процесса ВДП. Тепловая модель системы расходимый электрод – слиток – кристаллизатор, используя данные по расходу электрической энергии и теплового потока, позволяет рассчитать температурное поле в осевом сечении слитка и массовую скорость плавки в любой момент времени. Для определения массовой скорости плавки предложен коэффициент распределения мощности дуги, зависящий от диаметра электрода, слитка и значения межэлектродного промежутка

$$K_q = f(D_{кр}, d_{эл}, L_d) . \quad (18.294)$$

Предложены алгоритмы и методы определения включений повышенной плотности (ВПП) в титановых пластинах металлоотходов, использующихся для обварки прессованных электродов. Основу методов обработки видеоизображений составили преобразования Фурье, Адамара. Для определения пластины в кадре использовались яркостные признаки и гистограммные признаки. Была разработана структурная схема рентген-телевизионной установки на базе отечественного усилителя рентгеновского изображения УРИ-612П.

Проведены исследования и анализ закономерностей технологического процесса ВДП и разработке программного обеспечения использующегося для выделения ВПП в титановых пластинах. Показаны основные соотношения для вычисления скорости движения электрода. Исследовано влияние важнейших технологических параметров на массовую скорость плавления вакуумной дуговой печи и удельные расходы электроэнергии при заданном межэлектродном промежутке на основном периоде плавления.

При определении межэлектродного промежутка использовали аналоговый стационарный фильтр Калмана, позволяющий при раз-

личных оценках межэлектродного промежутка по моделям падения напряжения и частоты капельных замыканий получить оптимальную оценку межэлектродного промежутка на основе стационарных гауссовых сигналов.

$$L_{\text{opt}} = L_u \cdot \frac{\sigma_f^2}{\sigma_u^2 + \sigma_f^2} + L_f \cdot \frac{\sigma_u^2}{\sigma_u^2 + \sigma_f^2} \text{ мм}, \quad (18.292)$$

$$1/\sigma_{\text{opt}}^2 = \left(1/\sigma_u^2 \right) + \left(1/\sigma_f^2 \right) \text{ мм}, \quad (18.293)$$

где L_{opt} – оптимальная оценка;

L_u – оценка по модели падения напряжения;

L_f – оценка по частоте капельных замыканий;

σ_u^2 – дисперсия по падению напряжения на дуге;

σ_f^2 – дисперсия частоты капельных замыканий.

Изменение массовой скорости плавления от межэлектродного промежутка для жаропрочных сплавов на никелевой основе показано на рис. 18.118.

Разработано программное обеспечение определения ВПП. Описана работа автоматизированной системы рентгентелевизионного контроля в автоматическом режиме функционирования. Показано, что система в автоматическом режиме работы определяет ВПП диаметром 0,6 мм без участия оператора рентгендефектоскописта. Обработанные видеоизображения с выявленными ВПП записываются в базу данных компьютера и имеют возможность дополнительного просмотра.

На основании проведенных исследований были даны рекомендации по совершенствованию и модернизации вакуумных дуговых печей применительно к плавильным цехам ВСМПО, а также применению математических моделей во время ее эксплуатации.

Разработана модернизированная система управления процессом плавления на базе программируемых контроллеров и панелей отображения фирмы Allen-Bradley.

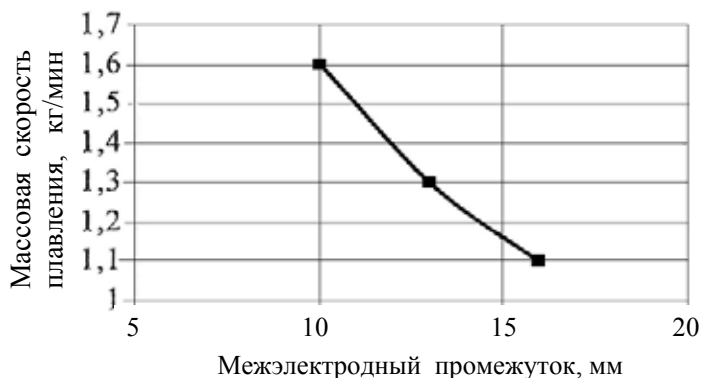


Рис. 18.118. Изменение массовой скорости плавления металла от значения межэлектродного промежутка для постоянной силы тока дуги

Были сформулированы требования к системе управления процессом вакуумного дугового переплава, составлен перечень задач базового и верхнего уровня, обоснована необходимость реализации оптимизационных задач.

Принятая к реализации система управления и контроля процессом ВДП и корректировка режимов работы, выполненных в апреле 2000 г., позволило получить следующие результаты:

- управлять процессом плавления с оптимальной скоростью расходимого электрода;
- поддерживать межэлектродный промежуток на заданном уровне по математическим моделям параметров падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий и заложенным алгоритмам;
- идентифицировать процесс «ионизации» и производить коррекцию скорости движения электрода в реальном времени;
- предоставлять оператору-технологу (плавильщику) текущую информацию о технологическом процессе в реальном времени;
- производить расчет массовой скорости плавления, высоты и объема ванны жидкого металла, высоту наплавленного слитка, остаток электрода, а также времени окончания процесса плавки.

Таким образом, использование предложенных разработок позволит создать современную высокоэффективную систему автоматизированного управления процессом плавки.

Результаты работы были приняты к практической реализации на вакуумной дуговой печи плавильного цеха ОАО "ВСМПО".

Контроль и регулирование межэлектродного промежутка в процессе вакуумной дуговой плавки

Данный метод относится к способам управления процессом вакуумного дугового переплава высокореакционных металлов и сплавов, и может быть использован, в частности, при выплавке слитков из стальных, никелевых и титановых сплавов [18.23; 18.224].

При этом важно эффективно контролировать и регулировать межэлектродный промежуток – промежуток между электродом и формирующимся слитком (см. рис. 18.120).

Известный способ вакуумной дуговой плавки слитков титановых сплавов включал в себя подготовку расходующихся электродов к плавлению, начальный период плавки, после которого устанавливали оптимальную величину межэлектродного промежутка, порядка 10-60 мм, и поддерживали ее с точностью ± 5 мм до окончания процесса плавления расходующего электрода путем одновременного измерения напряжения на дуге, повышения давления в печи и корректировки значений этих величин до заданных путем изменения скорости перемещения сплавляемого электрода вниз.

Недостатком известного способа являлось то, что контроль и регулировка межэлектродного промежутка происходили по ярко выраженному значению скачка напряжения на дуге и давления в камере печи, по величине которых достаточно объективно можно контролировать межэлектродный промежуток, величина которого находится в пределах, равных 25-40 мм. При значении межэлектродного промежутка в пределах от 0-25 мм погрешности в измерении напряжения на дуге вносили короткие капельные замыкания (ККЗ) и броски напряжения, имеющие иную природу и связанные с процессами на катоде и аноде (далее «шумы»). При этом напряжение на дуге и давление в камере печи не коррелируют с величиной межэлектродного промежутка.

Также применяется устройство в способе вакуумного дугового переплава слитков с поддержанием величины межэлектродного промежутка по параметрам частоты капельных замыканий плавящегося металла. Устройство контроля включает в себя датчик напряжения, включающий аналого-цифровой преобразователь, компаратор, микропроцессор, регулятор-контроллер и привод.

Однако недостатком этого способа являются возможные ошибки оценки межэлектродного промежутка из-за «шумов», которые на-

кладываются на сигналы ККЗ и вызывают погрешности при оценке межэлектродного промежутка.

Целью нового метода являлось создание способа контроля и регулирования процесса вакуумной дуговой плавки, который даст возможность эффективно контролировать и поддерживать межэлектродный промежуток, в том числе и в пределах расстояния от 0 до 25 мм, и устройство для его осуществления.

При этом способе контроля и регулирования межэлектродного промежутка в процессе вакуумной дуговой плавки измеряется напряжение на дуге с получением контролируемого сигнала напряжения, приводится анализ его изменения, по нему определяется фактическая величина межэлектродного промежутка и приводится регулирование положения расходующего электрода относительно выплавляемого слитка, при этом измерение напряжения производится с частотой не ниже 10 кГц, с последующим выделением сигналов коротких капельных замыканий, определение и регулирование по ним межэлектродного промежутка.

Для реализации данного метода устройство для контроля и регулирования межэлектродного промежутка в процессе вакуумной дуговой плавки, включающем датчик напряжения, ЭВМ, привод электрода с регулятором-контроллером, дополнительно установлено устройство фильтрации сигналов коротких капельных замыканий от сигналов, имеющих иную природу, с использованием датчика измерения напряжения с частотой опроса не менее 10 кГц.

Устройство фильтрации сигналов коротких капельных замыканий дополнительно снабжено блоками: фильтрации высокочастотной составляющей, пороговым устройством, компаратором и устройством формирования выходных импульсов, причем сигнал напряжения на дуге подается на вход блока фильтрации, выход этого блока соединен с входом порогового устройства, выход которого подключен к компаратору, выход которого соединен с входом устройства формирования импульсов капельных замыканий.

Вакуумная дуговая плавка расходующего электрода включает процесс управления кристаллизацией сплава. Управление осуществляется непосредственным изменением вводимой в расплав энергии, причем распределение этой энергии влияет на скорость плавления, на потоки в ванне расплава и, соответственно, на объем жидкой ванны.

Одним из основных параметров, влияющих на распределение энергии, является межэлектродный промежуток (расстояние между расходуемым электродом и выплавляемым слитком). С его увеличением энергия дуги, которая могла быть использована на плавление, будет рассеиваться за счет непосредственного излучения на стенку охлаждаемого кристаллизатора. Поэтому особо важным фактором является возможность регулирования величины межэлектродного промежутка для обеспечения эффективности вакуумной дуговой плавки расходуемого электрода.

При уменьшении межэлектродного промежутка менее 5-8 мм происходит увеличение частоты ККЗ до 10–15 Гц, что приводит к гашению дуги и, как следствие, к дестабилизации режима плавки металла.

В процессе вакуумного дуговой плавки наблюдаются резкие скачки напряжения на дуге, которые имеют различную физическую основу.

Доминируют два процесса:

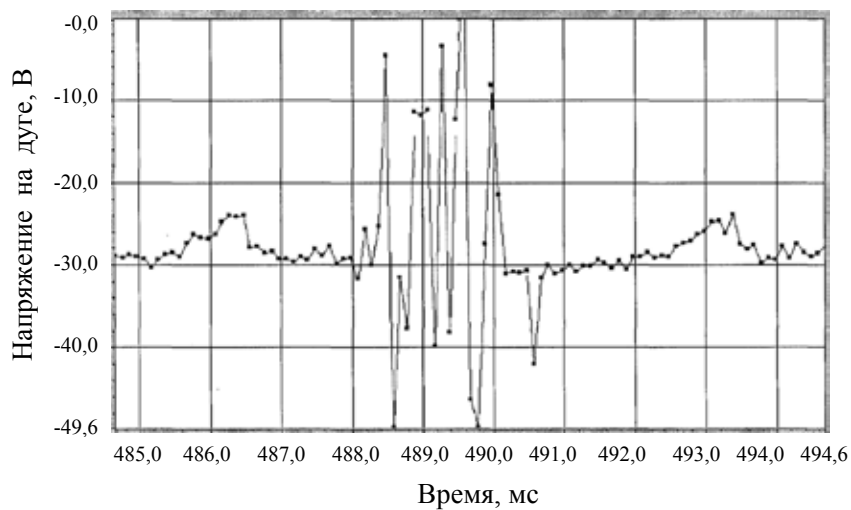
- первый - так называемые «шумы»;
- второй - капельное короткое замыкание (ККЗ).

Их сущность поясняется графическими материалами, на которых приведены их параметры: см. рис. 18.119 – диаграммы записи напряжения на дуге, соответствующие шумам, рис. 18.119, *а* и *б* и ККЗ (рис. 18.119, *в* и *г*).

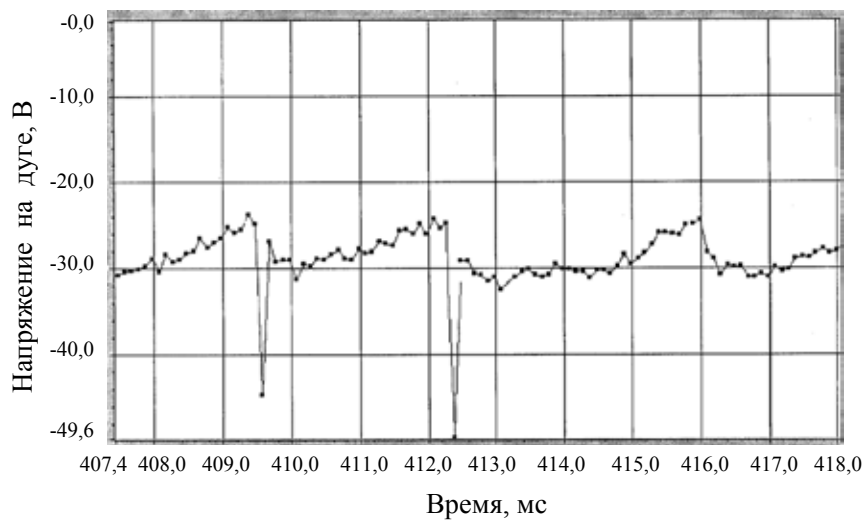
Шумы возникают при выделении в процессе плавки паров газов: в основном водорода, хлора, азота. Происходит резкое изменение электропроводности дуги. В течение 1 мс наблюдается 5-10 скачков напряжения со среднего значения (20-25 В) до нулевого уровня, либо до 50-60 В и выше со скоростью $5 \cdot 10^5$ В/с, после чего напряжение стабилизируется (см. рис. 18.119, *а* и *б*). Эти скачки напряжения мало зависят от величины междугового зазора.

ККЗ, изображенное на рис. 18.119, *в* (далее тип *А*), возникает при малых межэлектродных промежутках 8-15 мм, в результате образования мостика жидкого металла на торце плавящегося электрода и последующее его замыкание на зеркало ванны жидкого металла. В момент касания происходит резкое изменение напряжения на дуге до уровня 0-7 В на время 1-10 мс за счет её шунтирования жидким металлом. После прекращения шунтиро-

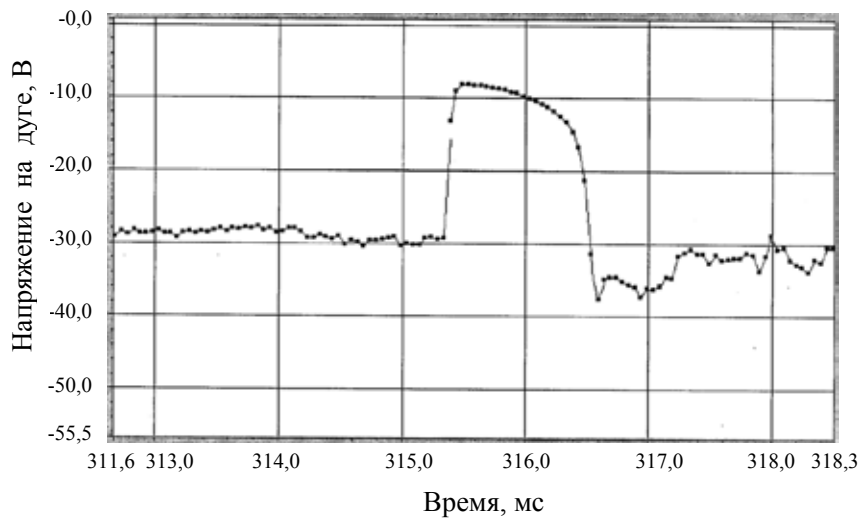
вания падение напряжения на дуге восстанавливается до прежнего значения 20-25 В.



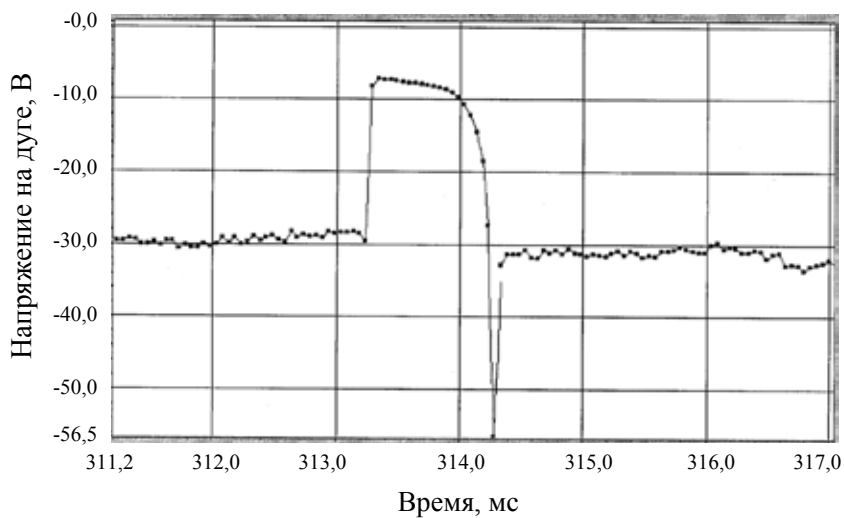
a



б



а



б

Рис. 18.119. Характерные примеры изменения напряжения на дуге:
а, б – соответствующие «шумам»; *в, г* – капельное замыкание типа *А* и *В*

ККЗ, изображенное на рис. 18.119, *з* (далее тип *В*), возникает при малых межэлектродных промежутках 3-10 мм, в результате образования дуги между каплями жидкого металла на торце плавящегося электрода и зеркалом ванны жидкого металла. В момент замыкания происходит резкое уменьшение напряжения на дуге до уровня 0-7 В на время 1-10 мс и более. При протекании тока через мостик происходит взрыв жидкого проводника из-за развития МГД-процессов, что сопровождается появлением пиков напряжения 50-70 В.

Таким образом, частота ККЗ типа *А* и *В* зависит от величины межэлектродного промежутка.

Предлагаемый способ реализуется посредством устройства, схема которого приведена на рис. 18.120.

Устройство содержит: блок 1 – датчик напряжения на дуге, блок 3 – фильтр низкой частоты для выделения низкочастотной составляющей сигнала, блок 2 – фильтр высокой частоты для выделения частотной составляющей сигнала, характеризующей тип ККЗ, блоки 4 – устройства порогового срабатывания с заданной уставкой порога срабатывания, блоки 5 – компаратор, блок 6 *а* – устройство формирования сигнала ККЗ (тип *А*), блок 6 *б* – устройство формирования сигнала ККЗ (тип *В*), системы компьютерной обработки, состоящей из управляющего контроллера 7 и промышленного компьютера с дисплеем 8. Контроллер управляет скоростью движения плавящегося электрода и выполняет функции регулятора межэлектродного промежутка, 9 – электропривод перемещения расходоуемого электрода, 10 – вакуумная дуговая печь.

При поступлении сигнала напряжения на дуге блок 3 фильтрует высокочастотную составляющую этого сигнала и выдает постоянную составляющую сигнала напряжения. Блок 2 выделяет высокочастотную составляющую напряжения на дуге, а также фильтрует шумы.

Далее сигнал после блока 2 поступает в устройства порогового срабатывания (блоки 4), где происходит сравнение сигнала с заданным порогом. Блок 4 *а* имеет уставку от -10 % до -30 % от исходного сигнала, а блок 4 *б* имеет уставку от +10 % до +30 % от исходного. Если постоянная составляющая сигнала напряжения превысила порог срабатывания в блок 4 *а*, то выдается сигнал на блок 5 *а*. Если постоянная составляющая сигнала падения напряжения оказалась меньше порога срабатывания, то выдается сигнал на блок 5 *б*.

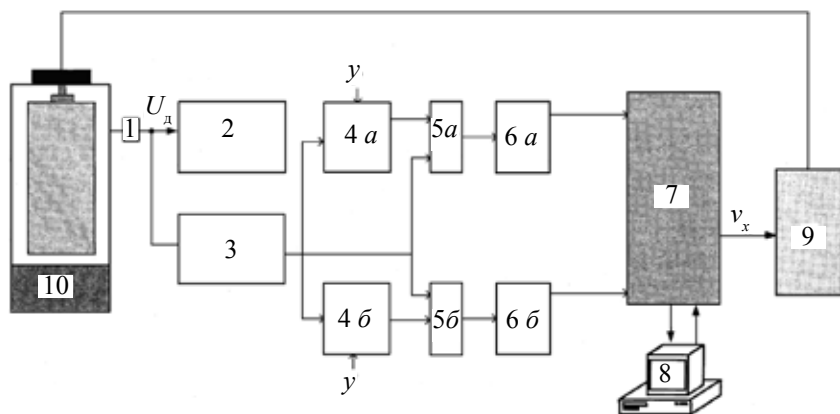


Рис. 18.120. Схема устройства для регулирования межэлектродного промежутка по методу ККЗ:

1 – датчик напряжения на дуге; 2 – фильтр высокой частоты; 3 – фильтр низкой частоты; 4 – устройство порогового срабатывания; 5 – компараторы; 6 а и 6 б – устройства формирования сигналов ККЗ типа А и В соответственно; 7 – управляющий контроллер; 8 – дисплей; 9 – электропривод; 10 – вакуумная дуговая печь

После этого сигналы поступают в компаратор (блок 5 а), где происходит сравнение сигналов с блока 4 а и сигнала с блока 3. После сравнения этих сигналов в блоке 6 формируется сигнал ККЗ типа А. Таким же образом в блок 5 б поступают сигналы с блока 4 б и блока 3, и после их сравнения формируется сигнал капельного замыкания типа В. Далее сигналы в виде коротких импульсов заданной амплитуды и длительности поступают в систему компьютерной обработки (блоки 7 и 8). Система обрабатывает сигналы и выдает команду на электропривод перемещения расходуемого электрода 9 вакуумной дуговой печи 10.

Измерение напряжения на дуге проводится с частотой не менее 10 кГц. Это обусловлено быстротечностью процессов, вызывающих шумы и ККЗ, длительность которых находится в пределах 0,1-10 мс. Далее производится классификация сигналов по их признакам и выделение сигналов ККЗ типа А и типа В. ККЗ типа А регистрируется по падению напряжения приблизительно на 20 В и по соответствующему периоду. ККЗ типа В регистрируется по увеличению напряжения на 20-40 В и периоду. Сигналы ККЗ подаются в систему

компьютерной обработки, которая по частоте сигналов и статистическим моделям определяет величину межэлектродного промежутка. Для каждого конкретного сплава зависимость количества сигналов ККЗ от межэлектродного промежутка определяется индивидуально, опытным путем. Затем эти данные вводятся в память компьютера. После расчета величины фактического межэлектродного промежутка она сравнивается с требуемой величиной промежутка и формируется сигнал, характеризующий разность этих величин. Сигнал обрабатывается и на его основании передается исполнительная команда на привод перемещения расходоуемого электрода.

Плавление расходоуемых электродов осуществляли в вакуумной дуговой электропечи ДТВ-8,7-Г10, оснащенной системой регулирования плавкой.

Расходоуемый электрод сплава Inconel 718 диаметром 500 мм, длиной 2100 мм загрузили в кристаллизатор диаметром 600 мм. После загрузки и центровки электрода произвели его приварку к огарку, укрепленному на электрододержателе. Печь вакуумировали, включили источник питания и навели ванну жидкого металла по серийной технологии. После наплавления слитка высотой 200 мм ток дуги уменьшали до 6,5 кА (рабочий ток) и напряжения на дуге 25,2 В. Межэлектродный промежуток установился порядка 8-10 мм - оптимальный зазор для этого сплава. Плавление расходоуемого электрода происходит при плоском торце электрода. По мере опускания электрода с постоянной скоростью происходил прогрев электрода, вследствие чего увеличилась скорость плавления металла, что привело к увеличению (растягиванию) межэлектродного промежутка до 20 мм. Появился сигнал капельных замыканий типа *B*. Регулятор-контролер увеличил скорость подачи электрода вниз на 0,1 мм/мин, сигнал частоты капельных замыканий типа *B* уменьшился до нулевого уровня.

Во втором случае плавление электрода осуществляли также как в предыдущем примере. Отличие заключается в переплаве титанового сплава 10V-2Fe-3Al. Рабочий ток дуги 8,5 кА; падение напряжения на дуге 26,1 В; дуговой зазор 12 мм. Плавление ведется при плоском торце электрода. Сигналы после выделения капельных замыканий подаются в контроллер фирмы ALLEN-BRADLEY, который служит регулятором скорости движения электрода. Во время вакуумного дугового переплава при появлении капельных замыканий типа *A*, с частотой 5-10 Гц, скорость движения электрода автоматически

уменьшалась до исчезновения этого сигнала, а частоту капельных замыканий типа *B* поддерживали с частотой 4-7 Гц. Таким образом, поддерживали постоянный межэлектродный промежуток 12 мм по всему сечению электрода. При достаточном прогреве электрода во время плавки скорость плавления увеличилась, произошло увеличение межэлектродного промежутка. Это привело к увеличению задания скорости движения плавящегося электрода автоматически контроллером на 0,1 мм/мин. Окончание процесса плавления проводили по известной технологии. Полученный слиток был с хорошо проплавленной боковой поверхностью, без затеков, и был сдан без механической обработки.

18.7.3. Автоматизированная система диагностики и управления качеством продукции в процессе непрерывного литья заготовок

Данная работа проводилась А.Г. Бабенко под руководством В. Г. Лисиенко и Г.Л. Хазана и явилась также предметом кандидатской диссертации* [18.38; 18.225-18.227].

Актуальность данной работы определяется тем, что в настоящее время быстрыми темпами идет развитие упаковочной отрасли. Наряду с традиционным использованием алюминиевых упаковок увеличивается потребление полимерных упаковок. Между поставщиками в новых рыночных условиях усиливается конкурентная борьба. Благодаря минимизации расходования ресурсов при производстве, транспортировке, хранении и потреблении продукции, потребление алюминия для упаковочных материалов остается на высоком уровне и составляет примерно 20-25 % от всего потребления по всем областям применения в мире.

Получение листовой заготовки для производства фольги из алюминиевых сплавов методом непрерывного литья имеет значительные преимущества по сравнению с традиционными схемами проката фольги из слитка: не требуются значительные капитальные вложения; снижается расход электроэнергии; не нужны большие

* Бабенко А.Г. Математическое моделирование и разработка системы диагностики состояния процесса и управления качеством продукции: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.Г. Бабенко. - Екатеринбург. 2008. - 27 с.

производственные площади; уменьшается количество обслуживающего персонала; обеспечиваются условия для комплексной механизации и автоматизации. Однако освоение совмещенного процесса литья и прокатки сопровождается некоторыми затруднениями, а именно: этап получения листовой заготовки обладает низкой производительностью и неустойчивостью технологического процесса. В первую очередь это связано со сложностью организации эффективного управления, так как процесс непрерывного литья листовой заготовки является сложным многофакторным процессом. Даже небольшая нестабильность факторов приводит к ухудшению качества фольги. Процесс производства фольги предусматривает обработку заготовки при многократных обжатиях, когда толщина фольги соизмерима с размером образующихся дефектов, поэтому дефектность продукции чаще всего приводит к браковке фольги.

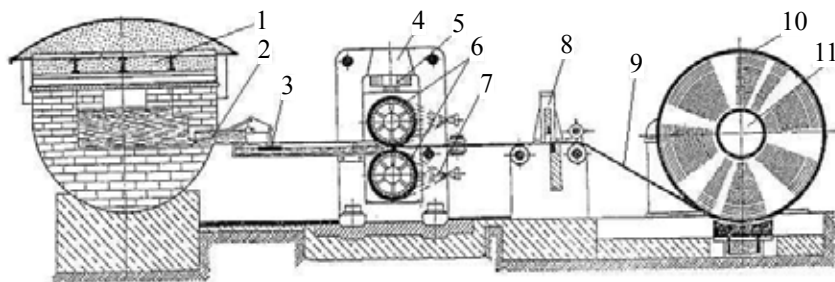


Рис. 18.121. Агрегат непрерывного литья с подводом расплава сбоку
1 – электромиксер; 2 – летка; 3 – переливочное устройство; 4 – литейно-прокатная клеть, 5 – нажимное устройство, 6 – валки-кристаллизаторы, 7 – технологическая смазка, 8 – узел обрезки кромок, 9 – полоса, 10 – рулон, 11 – наматывающее устройство

Схемы технологического процесса получения заготовки представлены на рис. 18.121 и 18.122. Комплекс бесслитковой прокатки устанавливается в сочетании с плавильными печами. После обработки в печах расплав поступал в миксер. Подготовленный и доведенный до необходимой температуры алюминиевый сплав из миксера направляется в емкость для рафинирования и затем через литниковую систему равномерно распределяется в зазоре валков-кристаллизаторов. В результате контакта с поверхностью валков,

которые также являются и кристаллизаторами, жидкий металл кристаллизуется и затем подвергается горячей деформации непосредственно в зазоре вращающихся валков. Листовая заготовка в виде прокатанной полосы проходит правку и обрезку кромок, сматывается в рулон на шпулю, закрепленную в наматывающем устройстве.

Процесс непрерывного литья листовой заготовки является сложным многофакторным процессом.

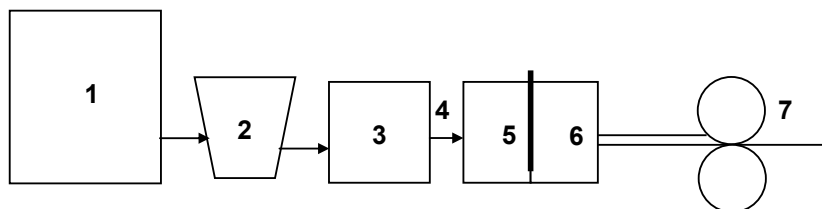


Рис. 18.122. Общая технологическая схема получения заготовки
1 – отражательная печь; 2 – литейный ковш; 3 – электрический миксер;
4 – металлопровод; 5, 6 – проточная емкость; 7 – прокатная клеть

Получение фольги из заготовок БП имеет производственный цикл от 10 до 14 суток. При этом часто возникают ситуации, когда не удается выяснить истинные причины дефектов. Появление брака конечного продукта может быть причинно обусловлено особенностями любой из многочисленных стадий технологического процесса, а некоторые дефекты имеют наследственный характер. Типичные дефекты заготовки БП представлены на рис. 18.123.

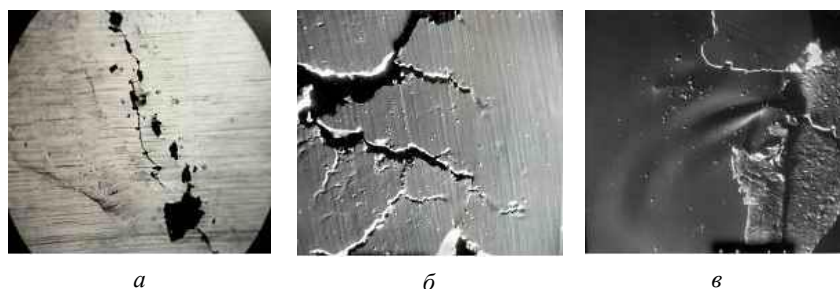


Рис. 18.123. Дефекты заготовки бесслитковой прокатки:
а – горячие трещины; б – холодные трещины при ликвидации Fe и Ti;
в – газовая и усадочная пористость

Для описания существующих дефектов используется система классификации, которая основана на описании физической природы дефекта. Она позволяет идентифицировать дефект путем непосредственного осмотра продукции в соответствии с его описанием. В данной классификации выделяется восемь категорий дефектов:

- выступы (неровности) на фольговой заготовке;
- полости (раковины);
- несплошности (разрывы);
- дефекты поверхности;
- незавершенная отливка;
- неправильные размеры или форма;
- включения или структурные аномалии;
- дефекты алюминиевой фольги.

Каждая категория разделяется на группы и подгруппы.

Была разработана модель технологического процесса непрерывного литья заготовок алюминиевой фольги. Описание этого процесса во всей полноте — чрезвычайно сложная задача, так как на него оказывают влияние большое число факторов, поэтому при построении модели произведен выбор факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество продукции. Необходимость построения многофакторной модели была продиктована тем, что для исследуемого процесса известны механизмы действия тех или иных факторов на качество продукции по отдельности, однако, одновременное действие тех же факторов, когда проявляются эффекты их взаимодействия, изучено в значительно меньшей степени.

Разработана методика построения модели технологического процесса непрерывного литья заготовок алюминиевой фольги. Топология модели содержит 21 входную характеристику (расход лигатуры, расход аргона, давление в гидравлической системе прижимных домкратов и др.), 17 промежуточных характеристик технологического процесса (содержание водорода, температура литья, скорость литья и др.), устанавливаемых в результате обобщения входных характеристик и выступающих в качестве характеристик более высокого уровня, 33 выходных характеристики — показателей качества (вспучивание, анизотропия механических свойств, горячие трещины, сквозные отверстия и др.).

Проведен анализ собранного в цехе статистического материала

ла включающего значения как факторов (толщина ленты, скорость литья, температура в насадке, давление металла на валки, содержание водорода, химический состав расплава (содержание Fe, Si, Mn, Ti, Mg, Al), состав шихты (содержание скрапа, отходов 1 сорта, отходов 2 сорта, лигатуры, флюса, температура расплава в литейной насадке), так и механических свойств непрерывно-литых заготовок фольги, определяющих качество продукции (временное сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение, твердость). Номенклатура и перечень этих величин соответствовали сложившейся практике и нормативам технологического контроля, применяемых на предприятии ОАО «Фольгопрокатный завод» г. Санкт-Петербург. Целью статистической обработки было получение информации о взаимной коррелированности факторов, о наличии корреляций между откликами и факторами, о соответствии распределения контролируемых величин закону нормального распределения. При этом выполнены следующие этапы статистического анализа:

1) вычислены корреляции между факторами и корреляции между факторами и откликами;

2) проверена статистическая значимость коэффициентов корреляции между факторами и откликами;

3) проведена проверка закона распределения данных статистической выборки на близость нормальному закону, что позволяет делать выводы об устойчивости технологического процесса. При соблюдении условия нормальности и небольшой дисперсии значений из выборки, можно говорить об их стабильности в ходе технологического процесса, иначе, можно предполагать их нестабильность вследствие влияния внешнего некомпенсированного неслучайного воздействия.

В ходе статистического анализа был сделан вывод о том, что исследованные показатели качества подвергались некоторому внешнему неучтенному воздействию. Поэтому построение модели процесса непрерывного литья листовых заготовок алюминиевой фольги с использованием таких данных и применение полученной модели для управления качеством продукции может привести к нежелательным последствиям, к ухудшению качества заготовок. Проведение активного эксперимента было затруднено ограничени-

ем возможности реализации необходимых изменений технологических параметров на находящемся под управлением оборудовании, поэтому для получения данных был использован альтернативный способ – многомерный ситуационный экспертный опрос.

К многомерному ситуационному экспертному опросу привлекались высококвалифицированные специалисты, хорошо знающие технологию непрерывного литья и имеющие опыт работы в данной области более 10 лет. Экспертная группа состояла из 5 человек.

В процессе разработки системы диагностики на основе топологии модели технологического процесса непрерывного литья по результатам экспертного опроса произведено определение структуры многофакторной модели, в ходе которого выделены факторы и отклики, наилучшим образом характеризующие состояние технологического процесса и наиболее полно описывающие качество непрерывно-литой листовой заготовки. Первоначально отбор факторов и откликов производился методом непосредственного ранжирования факторов, однако при этом возникли трудности, так как с увеличением числа сравниваемых объектов потребовалось более точно их различать. В результате уменьшалась согласованность ответов экспертов, то есть увеличивалась субъективность экспертных данных, а, значит, увеличивалась содержащаяся в них ошибка. Для снижения субъективной составляющей в оценках процедура опроса была изменена: непосредственное ранжирование факторов и откликов заменено ранжированием методом парных сравнений. Расчет и сравнение коэффициентов ранговой корреляции Спирмена показал, что согласованность оценок при такой замене заметно возросла. В результате отбора существенных факторов и откликов на основе предложенной топологии получена структура модели технологического процесса – выбрано 5 входных технологических параметров – управляющих воздействий (содержание водорода, $\text{см}^3/100 \text{ г Al}$; соотношение содержаний Fe/Si , ед.; температура литья, $^{\circ}\text{C}$; скорость литья, м/мин ; давление металла на валки, МПа) и 9 показателей качества – выходных параметров (сквозные отверстия, шт./м^2 ; горячие трещины, шт./м^2 ; холодные трещины, шт./м^2 ; вспучивания поверхности, шт./м^2 ; анизотропия механических свойств, ед.; предел прочности при растяжении, МПа; поверхностные дефекты, шт./м^2 ; относительное удлинение, %; разнотолщинность, мм).

На следующем этапе создания диагностики был разработан метод многомерного ситуационного экспертного опроса. Его идея состоит в том, что парному сравнению подвергаются не отдельные факторы, а сочетания их возможных предельных уровней, т. е. технологические ситуации. При этом уровни факторов соответствуют плану активного эксперимента. Такое сравнение многомерных ситуаций более затруднительно для эксперта по сравнению с обычным одномерным ранжированием. Поэтому для облегчения этой работы и соответствующего повышения объективности оценок применяется цветовое кодирование технологических состояний, что позволяет получить для каждого состояния свой уникальный графический образ, помогающий экспертам увереннее различать сравниваемые ситуации.

Для организации диалога эксперта с компьютером, совмещенного с математической обработкой результатов по ходу автоматизированного опроса было разработано программное обеспечение «POLL». Программа имеет оконный графический интерфейс. Пример интерфейса программы на стадии определения структуры модели приведен на рис. 18.124.

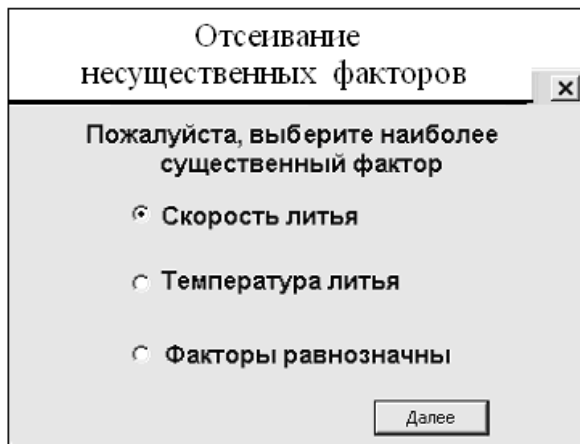


Рис. 18.124. Пример диалога с экспертом на этапе определения структуры модели

Предложенный метод многомерного ситуационного экспертного опроса был использован при построении многофакторной

модели процесса непрерывного литья листовых заготовок алюминиевой фольги. В ходе опроса эксперты сравнили 16 состояний технологического процесса, соответствующих плану дробного факторного эксперимента типа 2^{5-1} с генерирующим соотношением $X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4$, с целью получения оценок значений каждого из 9 показателей качества. В результате получены прогнозируемые значения откликов, на основе данных многомерного ситуационного экспертного опроса построены регрессионные уравнения в виде неполной квадратичной формы

$$y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_{j,k, j < k} b_{jk} X_j X_k, \quad (18.295)$$

описывающие зависимости показателей качества от технологических параметров.

Расчет коэффициентов регрессии выполнялся по известной формуле

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (18.296)$$

Разработан алгоритм функционирования диагностической системы. На основе анализа существующих систем технической диагностики и систем управления технологическими процессами были предложены и совмещены два варианта построения и функционирования диагностической системы, использующих вероятностный и нейросетевой подходы к определению параметров технологического процесса по показателям качества листовой заготовки.

В диагностической системе, использовавшей вероятностный подход, определение технологических параметров по значениям показателей качества производилось с помощью эвристического алгоритма, полученного в результате следующих рассуждений и допущений. Взаимосвязи откликов с факторами носят стохастический характер, поэтому нельзя исключить возможность порождения совокупности откликов любым наблюдавшимся сочетанием факторов. Вероятности таких событий можно считать обратно пропорциональными Евклидовым расстояниям между сочетаниями откликов, т. е. чем меньше Евклидово расстояние между векторами откликов, тем более вероятна близость соответствующих им векторов факторов. Расчет значений факторов, составляющих искомое технологи-

ческое состояние, заключается в средневзвешенном суммировании значений соответствующих факторов по всему объему рабочей базы данных диагностической системы. Весами являются величины обратно пропорциональные Евклидовым расстояниям между сочетаниями откликов рабочей базы данных и сочетанием откликов, для которого ищется соответствующее сочетание факторов.

Полученных в результате многомерного ситуационного экспертного опроса значений откликов для 16 точек факторного пространства было недостаточно для расчета технологических параметров по значениям показателей качества. Требовалось увеличение размера рабочей базы данных на несколько порядков. Для этого была использована статистическая методика *bootstrap*, применение которой заключалось в следующем:

- 1) на основе данных многомерного ситуационного экспертного опроса построены регрессионные уравнения в виде (18.295), описывающие зависимости показателей качества от технологических параметров;

- 2) сформировано 3000 технологических состояний (дальнейшее увеличение числа формируемых технологических состояний не давало улучшения результатов расчета), в которых значения факторов являлись случайными числами, равномерно распределенными в области допустимых значений;

- 3) для сформированных технологических состояний путем их подстановки в систему регрессионных уравнений найдены соответствующие значения показателей качества;

- 4) полученные сочетания значений технологических параметров (точки факторного пространства) и сочетания показателей качества (точки пространства откликов) внесены в базу данных диагностической системы, при этом определялось Евклидово расстояние от добавляемой точки факторного пространства до уже хранящихся в базе точек и если оно оказывалось меньше пороговой величины (пороговая величина выбиралась, таким образом, чтобы обеспечить обновление точек в базе при поординатном совпадении новых и старых точек факторного пространства более чем на 95 %), хранящаяся в базе точка факторного пространства и соответствующая ей точка пространства откликов заменялись новыми.

Для учета возможного дрейфа параметров технологического процесса и наличия субъективной составляющей в данных много-

мерного ситуационного экспертного опроса математическая модель технологического процесса была дополнена алгоритмом адаптации, который в системе, использующей вероятностный подход к диагностике технологических состояний, заключался в пересчете параметров регрессионных уравнений при поступлении новых данных, и повторной генерации рабочей базы данных в случае ухудшения точности диагностики состояния.

Во втором алгоритме построения и функционирования диагностической системы для определения технологических состояний по значениям показателей качества продукции использовалась нейросетевая модель исследуемым технологическим процессом, то есть применялся алгоритм систем нейрокомпьютинга. Обычно в таких системах в качестве обучающей выборки нейронной сети используются данные, полученные в результате наблюдения за ходом технологического процесса, что равносильно применению при построении модели технологического процесса данных пассивного эксперимента.

Одной из самых привлекательных особенностей искусственных нейронных сетей является возможность их обучения. Цель обучения состояла в том, чтобы для некоторого массива факторов сеть могла давать соответствующий массив откликов. Различают алгоритмы обучения с учителем и без учителя. Обучение с учителем состоит в предъявлении сети обучающих пар, содержащих набор факторов, задающих точку факторного пространства, и набор откликов объекта в этой точке. Эти данные используются для вычисления ошибки работы сети. Исходя из величины ошибки, в соответствии с выбранным алгоритмом обучения, производится подстройка параметров сети. Коррекция параметров сети постепенно приводит к тому, что каждый набор факторов преобразуется сетью в требуемый набор откликов.

По аналогии с нервной системой живых организмов функциональная единица нейронной сети называется нейроном. Обычно она состоит из входного сумматора, нелинейного преобразователя и точки ветвления на выходе. Сумматор формирует линейную комбинацию входов нейрона, нелинейный преобразователь обеспечивает возможность аппроксимации нелинейных функций. Графическое изображение искусственного нейрона приведено на рис. 18.125.

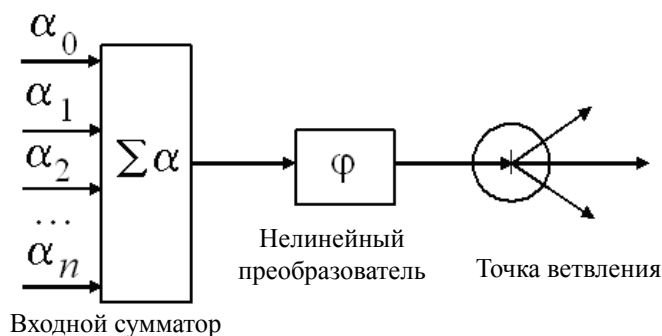


Рис. 18.125. Искусственный нейрон

Так же как отдельный живой нейрон ограничен в своих информационных возможностях, один искусственный нейрон имеет значительно более узкую сферу применения, чем их набор - сеть. Системы, состоящие из одного слоя параллельно соединенных нейронов, получили название однослойных перцептронов, системы, полученные каскадным соединением нейронов - многослойных перцептронов. Размер сети определяет сложность функциональной зависимости, которую она сможет аппроксимировать по обучающим данным. Однако уравнения, реализуемые нейронной сетью, не обладают наглядностью и, даже если модель адекватна, не позволяют по своему виду определить истинную форму зависимостей, которым подчиняются данные.

Сравнение двух вариантов функционирования системы диагностики по критериям точности, требованиями к вычислительным ресурсам, скорости разработанной системы, скорости адаптации позволило прийти к заключению, что наибольшей эффективностью обладает их комбинация (блок-схема приведена на рис. 18.126), которая использует нейронную сеть для расчета диагностируемой технологической ситуации, начальную обучающую выборку нейронной сети формирует обработкой результатов многомерного ситуационного экспертного опроса, построением регрессионных уравнений вида (18.295) и применением методики bootstrap, как это было описано выше. Указанные блоки на рис. 18.126 используют методы, процедуры и модели, полученные в ходе выполнения данной работы.

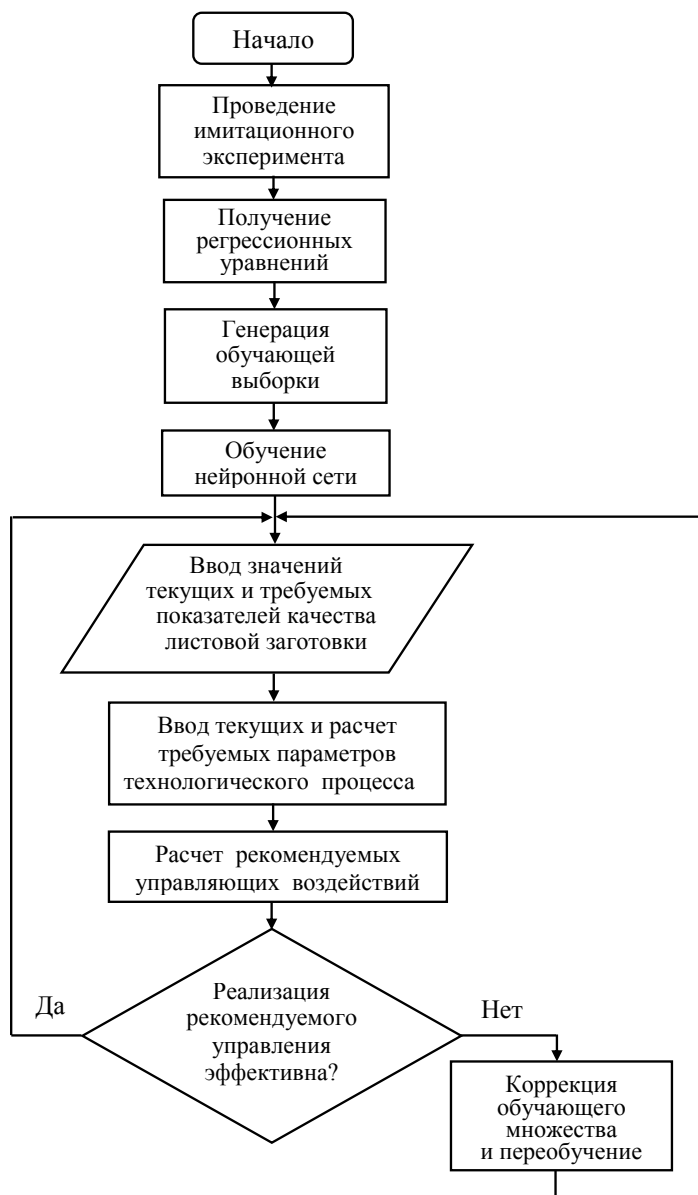


Рис. 18.126. Блок-схема алгоритма функционирования системы диагностики

Алгоритм адаптации модели модели в ходе эксплуатации системы, заключается в обновлении данных, содержащихся в обучающей выборке, данными о ходе технологического процесса, и повторном обучении сети в случае, если ошибка диагностики технологической ситуации слишком велика. Благодаря этому система диагностики получила способность на начальном этапе функционирования производить распознавание технологических состояний, опираясь на экспертные данные, а по мере накопления реальных данных адаптировать к ним модель технологического процесса, повышая тем самым адекватность модели, а значит и точность диагностики состояний.

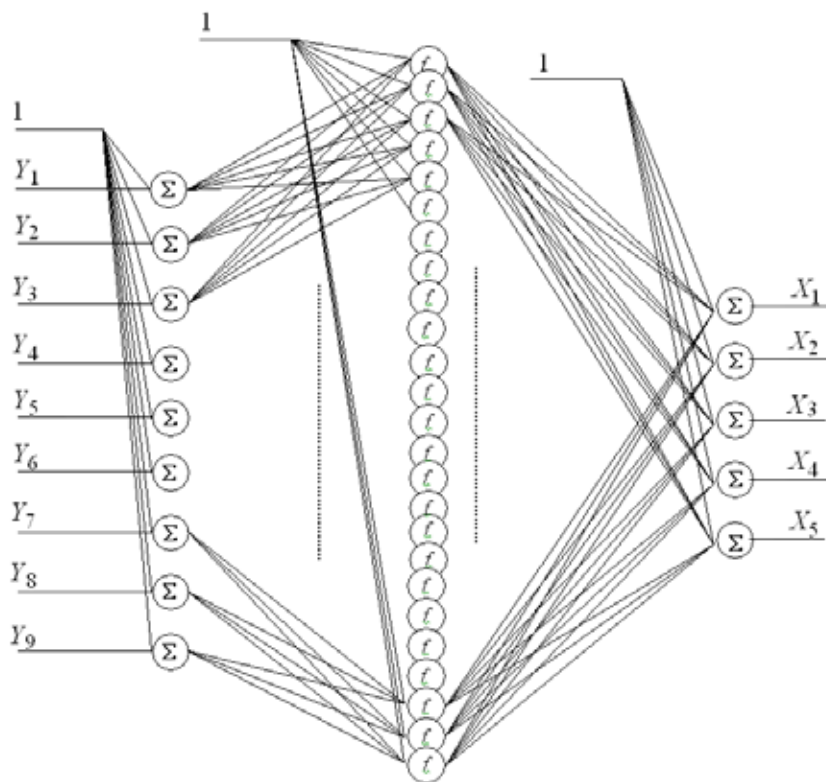


Рис. 18.127. Схема нейронной сети системы диагностики состояния технологического процесса

Нейросетевая модель управления технологическим процессом была реализована в виде трехслойного персептрона, содержащего 9 нейронов во входном слое, 5 нейронов в выходном слое и 25 нейронов в скрытом слое (рис. 18.127). Запись модели в матричной форме имеет вид:

$$X = C3 \cdot f(C2 \cdot C1 \cdot Y), \quad (18.297)$$

где $Y = (1, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8, Y_9)^T$ – вектор входных сигналов, дополненный единичным сигналом нейронного смещения, (значения входных сигналов определяются по значениям показателей качества y_i , $i = 1, \dots, 9$, пересчетом их в единый масштаб, где максимальному значению показателя качества соответствует значение входного сигнала + 1, а минимальному – 0);

$f(\cdot)$ – операция применения ко всем компонентам вектора-аргумента за исключением первого (первый компонент вектора обеспечивает нейронное смещение нейронов 3 слоя и должен оставаться равным функции

$$f(x) = \frac{x}{0,1 + |x|}.$$

Здесь маленькими буквами обозначены значения технологических параметров и показателей качества, а большими буквами – значения соответствующих сигналов нейронной сети: x_1, X_1 – температура литья; x_2, X_2 – содержание водорода; x_3, X_3 – отношение содержаний Fe/Si; x_4, X_4 – скорость литья; x_5, X_5 – давление металла на валки;

y_1, Y_1 – показатель качества «сквозные отверстия»; y_2, Y_2 – показатель качества «горячие трещины»; y_3, Y_3 – показатель качества «холодные трещины»; y_4, Y_4 – показатель качества «вспучивание»; y_5, Y_5 – показатель качества «анизотропия механических свойств»; y_6, Y_6 – показатель качества «предел прочности»; y_7, Y_7 – показатель качества «поверхностные дефекты»; y_8, Y_8 – показатель качества «относительное удлинение»; y_9, Y_9 – показатель качества «разнотолщинность».

Сравнение альтернативных решений показало, что нейронная сеть обладает большей точностью, хотя работать с ней сложнее, так

как при снижении точности решения эту сеть приходится повторно обучать, в то время как для вероятностного алгоритма, не производящего анализ данных, достаточно изменить обучающее множество.

Диагностика технологических состояний использовалась в разработанной системе для выработки рекомендаций по ведению технологического процесса для управления качеством продукции. Особенность таких рекомендаций заключалась в расчете изменений нескольких технологических параметров, которые должны реализовываться одновременно.

Этот способ управления качеством продукции отличается от широко применяемого (в частности на предприятии ОАО «Фольгопрокатный завод», г. Санкт-Петербург) способа изменения факторов по одному, когда устранение дефекта одной категории часто сопровождается ухудшением ситуации из-за возникновения ранее не наблюдавшихся видов брака.

Алгоритм расчета рекомендуемых изменений технологических параметров для достижения требуемого качества включает следующие шаги:

1) на основании замеров службы технического контроля (ОТК) определяются значения показателей качества продукции в текущий момент времени, одновременно с этим производятся измерения параметров технологического процесса, характеризующих текущее технологическое состояние $x_{\text{тек}}$;

2) требования к продукции задаются заказчиком и регламентируют значения показателей качества. На основании этих значений, применяя процедуру диагностики, определяются соответствующие значения технологических параметров, т. е. требуемое технологическое состояние $x_{\text{тр}}$;

3) вектор рекомендуемых изменений вычисляется по формуле $\Delta x = (x_{\text{тр}} - x_{\text{тек}})/k$. Величина k определяет количество шагов изменения технологических параметров для достижения требуемого качества и введена с целью упреждения непредвиденных последствий (во время промышленных испытаний системы задавалось $k = 5$);

4) шаги 1)-3) повторяются, пока не достигнуто требуемое качество.

Здесь целью управления является достижение требуемых значений показателей качества, при этом на значения технологических параметров налагаются ограничения: $675 \leq x_i \leq 715$ (°C);

$0,06 \leq x_2 \leq 0,22$ (см³/100 г Al); $1 \leq x_3 \leq 3,5$ (ед.); $0,7 \leq x_4 \leq 1,2$ (м/мин); $1100 \leq x_5 \leq 1650$ (МПа).

Пример оценки качества. Текущее качество продукции определялось показателями: $y_1 = 0,8$ (шт./м²), $y_2 = 0,8$ (шт./м²), $y_3 = 4$ (шт./м²), $y_4 = 1,2$ (шт./м²), $y_5 = 0,33$ (ед.), $y_6 = 125$ (МПа), $y_7 = 1,5$ (шт./м²), $y_8 = 15$ (%), $y_9 = 0,25$ (мм). При этом определены текущие значения технологических параметров: $x_1 = 688$ (°C), $x_2 = 0,13$ (см³/100 г Al), $x_3 = 1,86$, $x_4 = 1$ (м/мин), $x_5 = 1350$ (МПа). По предъявляемым к качеству требованиям необходимо установить $y_1 = 0,4$ (шт./м²). Расчет требуемого в этом случае технологического состояния дал следующие значения технологических параметров: $x_1 = 687$ (°C), $x_2 = 0,13$ (см³/100 г Al), $x_3 = 2,2$, $x_4 = 1$ (м/мин), $x_5 = 1330$ (МПа). Таким образом, нужное качество достигалось в основном изменением величины X_3 , что согласуется с результатами качественного анализа технологического процесса, т. е с топологией модели. В результате реализации управления технологическим процессом на основе рекомендаций разработанной системы были получены следующие показатели качества: $y_1 = 0,4$ (шт./м²), $y_2 = 0,8$ (шт./м²), $y_3 = 3,9$ (шт./м²), $y_4 = 1,2$ (шт./м²), $y_5 = 0,33$ (ед.), $y_6 = 126$ (МПа), $y_7 = 1,5$ (шт./м²), $y_8 = 15$ (%), $y_9 = 0,25$ (мм). Отклонение полученных результатов от требуемых значений качества не превысило 2 %. В более сложных случаях для достижения требуемого качества применялось одновременное изменение нескольких технологических параметров.

Таким образом, результаты производственных испытаний системы основывались на сборе исходных данных, построении модели, отладке и испытании системы диагностики на предприятии ОАО «Фольгопрокатный завод», г. Санкт-Петербург.

Исходные данные были собраны путем опроса группы экспертов предложенным методом многомерного ситуационного экспертного опроса. На первом этапе опроса экспертами на основе топологии модели были выделены 5 наиболее значимых входных параметров технологического процесса и 9 наиболее значимых показателей качества литой заготовки. На втором этапе путем сравнения 16 технологических ситуаций, являющихся комбинациями значений выбранных технологических параметров, соответствующих плану дробного факторного эксперимента типа 2^{5-1} , получены экспертные

оценки показателей качества непрерывнолитых заготовок в каждой из сравниваемых технологических ситуаций. Опрос экспертов проводился с помощью разработанной программы «POLL». Полученные данные использованы для формирования начальной обучающей выборки нейросетевой модели и построения нейросетевой модели технологического процесса.

Производственные испытания системы диагностики технологических ситуаций и управления качеством продукции заключались в проведении следующего ряда экспериментов:

1) определение значений показателей качества по предъявляемому набору параметров технологического процесса и сравнение их с реальными данными;

2) определение значений параметров технологического процесса по предъявляемому набору показателей качества и сравнение их с реальными данными;

3) расчет рекомендуемых изменений параметров технологического процесса для получения продукции требуемого качества, проверка правильности функционирования системы сравнением требуемых и полученных в результате реализации управления показателей качества.

В ходе промышленных испытаний произведено 10 серий первого типа, 10 – второго типа и 4 – третьего типа, при этом наибольшая погрешность результатов испытаний первого типа не превысила 10 %, второго типа – 12 %, третьего типа – 12 %.

В результате промышленных испытаний системы диагностики состояния технологического процесса и управления качеством фольговой заготовки в течение 90 ч (86 т заготовки) специалистами завода оценены следующие экономические показатели:

- рост выхода годной продукции при производстве фольги 40-65 мкм составил 15 %;
- расчётный экономический эффект от внедрения составил 1256 руб. на 1 тонну фольги.

Проведен анализ и дополнительные производственные исследования с целью оценки возможности широкого применения разработанного метода для ряда объектов в машиностроении и металлургии. Исследование в этом направлении производилось в частности на Кушвинском заводе литых прокатных валков. В результате и

здесь было установлено, что предварительно полученные модели в достаточной степени отражают характер зависимостей показателей качества от технологических параметров и могут далее использоваться для построения системы диагностики на основе нейросетевой модели технологического процесса. Это говорит о достаточной универсальности предложенного метода и возможности его более широкого применения.

18.7.4. Автоматизированная система управления газоочистными установками при производстве алюминия

Целью данной работы была разработка алгоритмов управления, с использованием математических моделей, позволяющих в рамках автоматизированных систем управления технологическим процессом сухой газоочистки для алюминиевых заводов повысить энергоэкологические показатели производства алюминия, снизить концентрации вредных выбросов в атмосферу и, как результат, улучшить экологическую обстановку в промышленных зонах.

Эта работа под руководством В. Г. Лисиенко проводилась аспирантом С.А. Зотовым*, работающим в то же время в составе цеха автоматизации завода с участием ряда сотрудников предприятия и ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы» (В.К. Кривовяз, Л.В. Федоров, М.В. Ожегов и др.) [18.228-18.232]. Большая помощь была оказана Л.С. Казариновым (Южно-уральский национальный исследовательский университет).

Общие принципы построения автоматизированной системы управления

Предприятия цветной металлургии и, в частности, предприятия алюминиевой промышленности являются крупномасштабными источниками загрязнения атмосферы.

В связи с этим, возникает необходимость в решении проблем промышленных предприятий в области газоочистки, экологии и, в частности, повышении уровня автоматизации технологических

* Зотов С.А. Усовершенствование системы автоматизированного управления сухими газоочистными установками алюминиевых заводов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / С.А. Зотов. – Челябинск: Южно-уральский государственный технический университет, 2011. – 26 с.

процессов, внедрении современных средств АСУТП и КИП. Эти проблемы решаются созданием газоочистных установок и последующей их автоматизацией.

В последнее время часто применяется сухой метод очистки газов, который осуществляется в низконапорном реакторе с взвешенным слоем частиц глинозема и рукавном фильтре, что обеспечивает улавливание фторидов, пыли и полициклических ароматических углеводородов. Наибольшее распространение сухого метода обусловлено двумя обстоятельствами. Во-первых, для мокрого способа очистки требуется большое количество воды и связанное с этим дорогостоящее и занимающее большие площади шламовое хозяйство. Во-вторых, улавливаемую сухим способом пыль гораздо легче утилизировать, чем шламовую пульпу, образующуюся при мокром способе.

Способы управления сухими газоочистными установками алюминиевых заводов, описанные в работах таких авторов, как М.Г. Ладыгичев, С.Б. Старк, М.Г. Мазус, Р.Р. Dawson и др., позволяют осуществлять управление, как правило, с непосредственным участием человека, что ставит управляющую систему в зависимость от его своевременного вмешательства. От этого может зависеть не только исправность аппаратных средств, но и качество очистки газов, поступающих с производства.

Поэтому существует необходимость в разработке алгоритмического обеспечения для автоматического управления сухой газоочистной установкой, наиболее полно отвечающего требуемым параметрам и режимам работы технологического оборудования, предъявляемым его производителями, т. е. в соответствии с технологией очистки производственных газов.

Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУ ТП) сухой газоочистки, в которую в результате работы добавлена подсистема – система автоматического управления регенерацией рукавных фильтров приведена на рис. 18.128. В системе автоматического управления регенерацией рукавных фильтров выделено 3 уровня, связанные между собой: нижний (уровень исполнительных механизмов и датчиков АСУ ТП), средний (уровень контроллеров и станций распределенной периферии) и верхний (уровень автоматизированных рабочих мест (АРМ) и систем диспетчерского управления и сбора данных (SCADA)).

Используемые технологии очистки производственных газов и общие характеристики, режимные параметры технологического процесса фильтрации газа заключаются в следующем.

Процесс регенерации фильтров является одним из основных технологических процессов «сухой» очистки газов, поскольку именно в рукавных фильтрах осуществляется разделение твёрдой и газообразных фаз при фильтрации пылегазовой смеси через фильтрующую перегородку. При фильтрации фторсодержащих газов через слой глинозёма на нетканом материале завершается процесс улавливания фтористого водорода оксидом алюминия. Очистка (регенерация) рукавов – импульсная, производится с помощью сжатого воздуха. Одновременно отряхивается один ряд рукавов. Сжатый воздух для регенерации с давлением подается в ресивер рукавного фильтра, установленный перед каждым рукавным фильтром. Пыль с рукавов периодически стряхивается пневматическими импульсами, создаваемыми электропневматическими клапанами по сигналу от микропроцессорного управляющего устройства с частотой, зависящей от величины гидравлического сопротивления фильтра. Пыль, удаленная с рукавов, осажается в бункере, ссыпается на тканевую перегородку аэрожелоба фильтра.

Базовые соотношения управления

«перепад давления – период между регенерациями»

Анализ литературных данных показал, что чаще всего на практике регенерация рукавов в рукавном фильтре производится автоматически: либо при достижении критического перепада давления, либо в результате срабатывания реле времени.

Для технических расчетов тканевых рукавных фильтров при улавливании грубых пылей А.С. Мандрико и И.Л. Пейсаховым была предложена математическая модель, выражающая зависимость между перепадом давления на рукавном фильтре и продолжительностью периода между регенерациями.

И в том, и в другом случае автоматизация процесса регенерации рукавов осуществляется путем оптимизации опытной зависимости между сопротивлением рукавного фильтра и временем межрегенерационного периода.

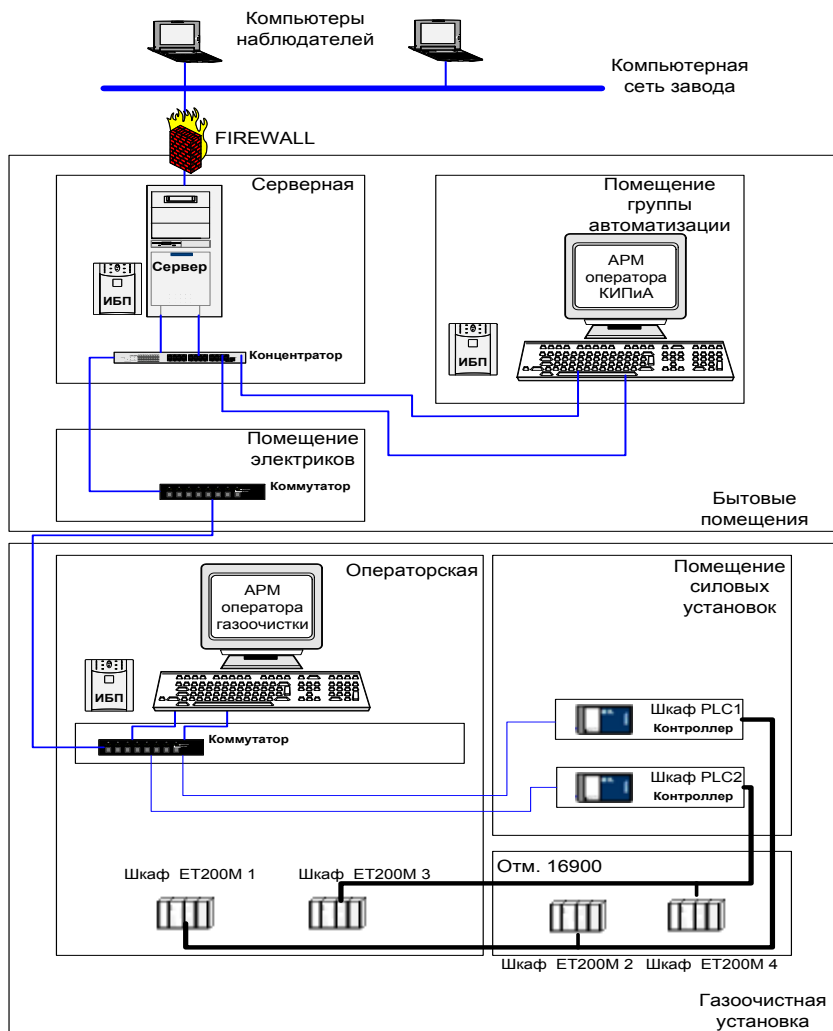


Рис. 18.128. Комплекс программно – технических средств (КПТС) АСУ ТП сухой газоочистки

Таким образом, существенное влияние на качество очистки, на длительность эксплуатации оказывает соответствие периода между регенерациями перепаду давления на рукавном фильтре. Схемы регенерации малоэффективны, если они не учитывают состояние запыленности рукавов.

Требовалось провести анализ и модели Мандрико и Пейсахова, и анализ экспериментальных данных графиков фильтров, после чего сравнить расчеты по модели Мандрико и Пейсахова с результатом анализа экспериментальных графиков фильтров. Это позволит разработать модель управления регенерацией рукавных фильтров, выражающую зависимость периода между регенерациями от перепада давления на рукавном фильтре.

На основе модели нужно было разработать алгоритмы программ автоматического управления и диагностики системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров. И далее реализовать их при создании системы автоматического управления технологическим процессом регенерации рукавных фильтров.

Также по результатам эксплуатации газоочистной установки необходимо провести энергоэкологический анализ процесса удаления газов при электролизе алюминия с использованием системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров, в соответствии с методикой полного (сквозного) энергоэкологического анализа, разработанного под руководством автора.

Был проведен анализ и модели Мандрико и Пейсахова, и экспериментальных графиков фильтров. Проведено сравнение результатов анализов. Разработана модель управления регенерацией рукавных фильтров для автоматизированного управления процессом, в зависимости от перепада давления на рукавном фильтре.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки (Па) может быть представлено суммой двух слагаемых:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = (A\mu w) + (B\mu Z w^2)t, \quad (18.298)$$

где ΔP_1 – постоянное сопротивление самой фильтровальной перегородки с учетом пыли, оставшейся на ней после регенерации, Па;

ΔP_2 – переменное сопротивление накапливающегося на фильтровальной перегородке слоя пыли, удаляемого с нее в процессе регенерации, Па;

A – коэффициент сопротивления фильтровальной перегородки с слоем пыли, оставшейся на ней после регенерации, м^{-1} ;

B – коэффициент сопротивления слоя пыли, м/кг ;

μ – динамический коэффициент вязкости газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

Z – запыленность газа перед фильтром при рабочих условиях, кг/м³;

w – скорость фильтрования, м/с;

t – время, с.

В модели (18.298) численные значения коэффициентов A и B определяются опытным путем.

Для ориентировочных подсчетов путем обработки экспериментального материала для частиц с $d_m \leq 20$ мкм были получены следующие значения коэффициентов A и B .

Таблица 18.26

Коэффициенты A и B (ткань – лавсан арт. 217)

	d_m (мкм)	A (м ⁻¹)	B (м/кг)	Вид пыли
1	0,5–0,7	$(13000–15000) \cdot 10^6$	$330 \cdot 10^9$	кремниевая, возгонная
2	2,5–3,0	$(2300–2400) \cdot 10^6$	$80 \cdot 10^9$	сталеплавильная, возгонная
3	10–20	$(1100–1500) \cdot 10^6$	$(6,5–16) \cdot 10^9$	кварцевая, цементная

Исследования показали, что чем мельче частицы улавливаемой пыли, тем выше коэффициенты A и B .

Для технических расчетов тканевых рукавных фильтров при улавливании грубых пылей (с $d_m > 20$ мкм) А.С. Мандрико и И.Л. Пейсаховым была предложена модель:

$$\Delta P = \frac{817\mu w(1-\varepsilon_{\Pi})}{d_m^2 \varepsilon_{\Pi}^3} \left[0,82 \cdot 10^{-6} d_m^{0,25} \varepsilon_{\Gamma}^3 (1-\varepsilon_{\Pi}) h_0^{2/3} + \frac{zw t}{\rho} \right], \quad (18.299)$$

где d_m – средний (медианный) размер частиц пыли, м;

ε_{Γ} – пористость ткани, доли единиц;

ε_{Π} – пористость пыли, доли единиц; $\varepsilon_{\Pi} = 1 - 79 d_m^{0,47}$;

h_0 – удельное гидравлическое сопротивление чистой ткани, Па;

ρ – плотность частиц пыли, кг/м³;

t – время между регенерациями, с.

С использованием модели (18.299), получено

$$\Delta P = (A_M \mu w) + (B_M \mu Z w^2) t;$$

$$A_M = 670 \cdot 10^{-6} \frac{(1 - \varepsilon_{\Pi})^2 \varepsilon_{\Gamma}^3 h_0^{2/3}}{d_m^{1,75} \varepsilon_{\Pi}^3}; \quad (18.300)$$

$$B_M = 817 \frac{(1 - \varepsilon_{\Pi})}{d_m^2 \varepsilon_{\Pi}^3}. \quad (18.301)$$

В формулах (18.300), (18.301) и ниже индекс M – означает, что коэффициенты A и B определяются из модели Мандрико и Пейсахова (18.299).

Важно было определить возможность применения формул для вычисления коэффициентов A_M и B_M для расчетов рукавных фильтров при улавливании пылей с $d_m \leq 20$ мкм.

Из проведенного анализа функций $A_M = f_1(d)$ и $B_M = f_2(d)$ и сопоставления значений коэффициентов A и B из табл. 18.26 с коэффициентами A_M и B_M , рассчитанными по формулам (18.300) и (18.301) при одинаковых размерах частиц d получено, что в промежутке $0,5 \leq d \leq 10$ мкм есть возможность использовать формулы (18.300) и (18.301), согласовав их с опытными данными табл. 18.26.

В рассматриваемом случае средний размер частиц пыли $d_m = 5$ мкм из табл. 18.26 взята строка 2 с $d_m = 2,5\text{--}3,0$ мкм близким к рассматриваемому. Из строки 2 получено:

$$\bar{d}_0 = \frac{(2,5 + 3,0)}{2} = 2,75 \text{ мкм}; \quad \bar{A}_0 = \frac{(2300 + 2400) \cdot 10^6}{2} = 2350 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

Тогда по формуле (18.300) при $d = \bar{d}_0$: $A_{M_0} = 378 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Получено значение $A_{M_0} = 378 \cdot 10^6 \neq \bar{A}_0 = 2350 \cdot 10^6$. Согласование величин A_{M_0} и \bar{A}_0 .

$$\bar{A}_0 = C_A \cdot A_{M_0} \Rightarrow C_A = \bar{A}_0 / A_{M_0} = 2350 \cdot 10^6 / 378 \cdot 10^6 = 6,22.$$

$C_A = 6,22$ – поправочный коэффициент для A_{M_0} .

Принято, что в некоторой окрестности точки $d_0 = 2,75$ мкм (куда входит и точка $d = 5$ мкм) формула $A = C_A \cdot A_M$ для определения коэффициента A в формуле (18.298) верна.

По формуле (18.301) при $d = \bar{d}_0$ $B_{M_0} = 9,88 \cdot 10^9 \text{ м/кг}$.

Получено $B_{M_0} = 9,88 \cdot 10^9 \neq \bar{B}_0 = 80 \cdot 10^9$. Были согласованы величины B_{M_0} и \bar{B}_0 .

$$\bar{B}_0 = C_B \cdot B_{M_0} \Rightarrow C_B = \bar{B}_0 / B_{M_0} = 80 \cdot 10^9 / 9,88 \cdot 10^9 = 8,1.$$

$C_B = 8,1$ – поправочный коэффициент для B_M

Было принято, что в некоторой окрестности точки $\bar{d}_0 = 2,75$ мкм (куда входит и точка $d = 5$ мкм) формула $B = C_B \cdot B_M$ для определения коэффициента B в формуле (18.298), верна.

Из формулы (18.298) при $A = C_A \cdot A_M$ и $B = C_B \cdot B_M$ получено

$$\Delta P_M = (C_A A_M \mu w) + (C_B B_M \mu Z w^2) t. \quad (18.302)$$

Обозначено: $a = C_A A_M \mu w$; $\epsilon = C_B B_M \mu Z w^2$, тогда

$$\Delta P_M = a + \epsilon \cdot t. \quad (18.303)$$

В уравнении прямой (18.303) a – свободный член. Начальная точка прямой ($a = \Delta P$ при $t = 0$) в – угловой коэффициент прямой.

Были найдены значения коэффициентов a и ϵ в формуле (18.303) для представленного случая: $d = 5$ мкм; ϵ_T ; h_0 – для иглопробивного фильтровального полотна; скорость фильтрования $w_1 = 1,3$; $w_2 = 1,5$:

$$a_1 = 908 \text{ Па}, \epsilon_1 = 6,85 \text{ Па/мин}; a_2 = 1047 \text{ Па}, \epsilon_2 = 9,12 \text{ Па/мин}.$$

Таким образом были получены линейные функции:

$$\Delta P_1 = a_1 + \epsilon_1 \cdot t = 908 + 6,85 \cdot t \text{ при } w_1 = 1,3 \text{ м/мин};$$

$$\Delta P_2 = a_2 + \epsilon_2 \cdot t = 1047 + 9,12 \cdot t \text{ при } w_2 = 1,5 \text{ м/мин}.$$

Графики этих функций - прямые линии представлены на рис. 18.129.

Для определения функциональной зависимости гидравлического сопротивления (ΔP) фильтра от времени (t), были получены экспериментальные графики, снятые на каждом 21 работающем фильтре (пример см. рис. 18.130 – для фильтра № 10). Каждый экспериментальный график имеет два участка. 1-й участок – регенерация включена. Автоматический регулятор поддерживает величину ΔP в фильтре приблизительно на одном уровне. 2-й участок – регенерация отключена. В это время величина ΔP в фильтре растет.

Каждый участок экспериментального графика имеет вид ломаной линии отрезки, которой соединяют точки $(t_i; \Delta P_i)$ $i = 1, \bar{N}$

через одну минуту. N – число точек, рассматриваемых на участке. При анализе было получено, что зависимость ΔP от t функциональная линейная и на 2 участке с отключенной регенерацией имеет вид: $\Delta P_{10} = 998 + 7,5 \cdot t = a_{10} + e_{10} \cdot t$.

Аналогично были найдены линейные функции и для остальных фильтров типа $\Delta P_K = a_K + e_K \cdot t$.

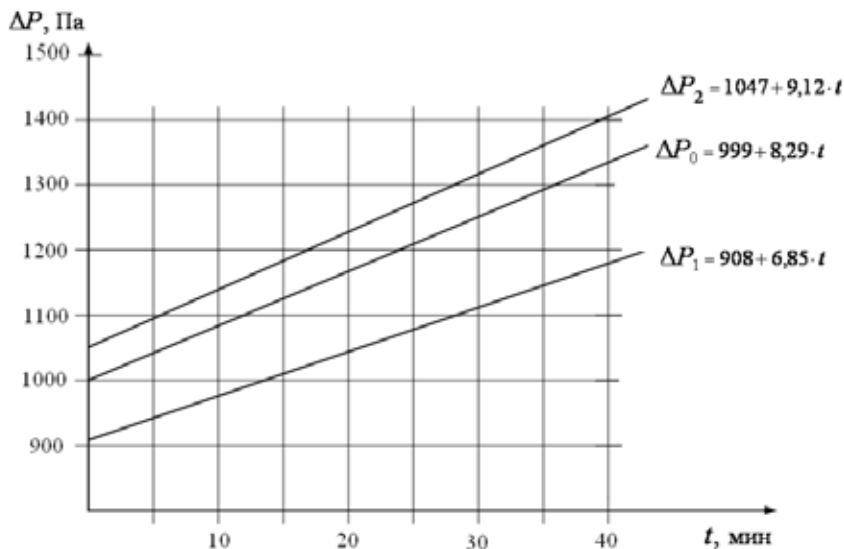


Рис. 18.129. Графики функции $\Delta P_M = a + e \cdot t$

Для сопоставления результатов полученных при анализе экспериментальных графиков с результатами, полученными при использовании модели Мандрико и Пейсахова (с поправочными коэффициентами $C_A = 6,22$ и $C_B = 8,1$) (см. формулу (18.302)), определены средние значения коэффициентов a и e , и найдены:

1. Средняя функция $\Delta P_M = f(t)$ при расчете по модели Мандрико и Пейсахова.

$$\overline{\Delta P_M} = \overline{a_M} + \overline{e_M} \cdot t = 978 + 7,96 \cdot t \text{ Па.}$$

2. Средняя функция $\overline{\Delta P_3} = f(t)$ при расчете по экспериментальным графикам фильтров.

$$\overline{\Delta P_3} = \overline{a_3} + \overline{e_3} \cdot t = 985 + 7,48 \cdot t \text{ Па.}$$

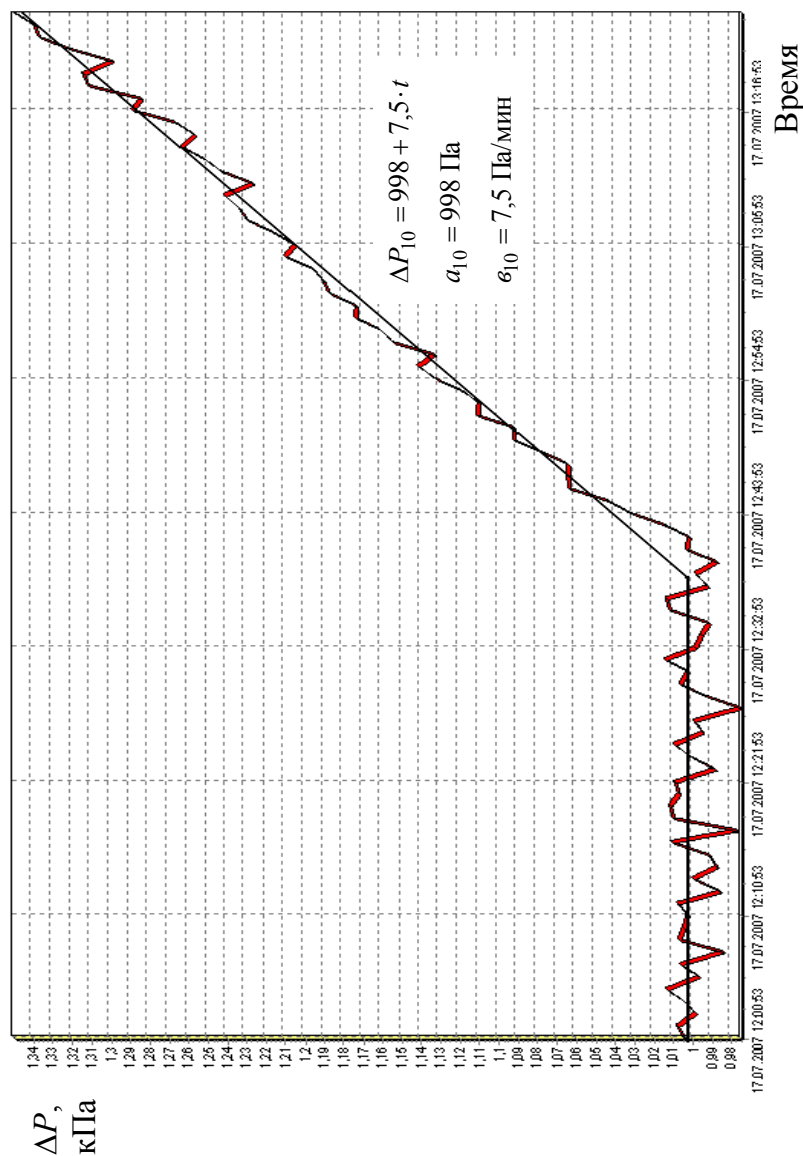


Рис. 18.130. График функции $\Delta P_{10} = 998 + 7,5 \cdot t$ (на экспериментальном графике рукавного фильтра)

Из сравнения результатов расчета по модели Мандрико – Пейсахова (с поправочными коэффициентами) с результатом анализа экспериментальных графиков 21 фильтра, следует, что оба способа определения зависимости $\Delta P = f(t)$ достаточно хорошо согласуются друг с другом (разница в значениях коэффициентов 0,7-6,4 %, в значениях $\Delta P_m - 0,4-0,7$ %) (рис. 18.131).

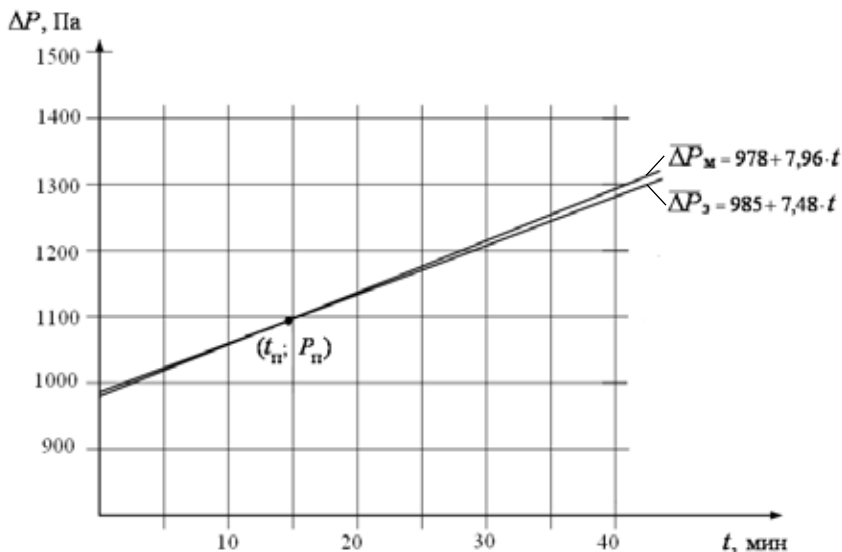


Рис. 18.131. Графики средних функций для ΔP : $t_{\text{п}}, P_{\text{п}}$ – точка пересечения

Из модели Мандрико и Пейсахова (18.302) при заданном перепаде давления до и после фильтра можно было найти необходимую продолжительность периода между регенерациями, т. е. продолжительность периода фильтрования

$$t_{\text{ф}} = \frac{\frac{\Delta P}{\mu \cdot w} - A}{B \cdot w \cdot z} = \frac{\frac{\Delta P}{\mu \cdot w} - C_A \cdot A_M}{C_B \cdot B_M \cdot w \cdot z}.$$

При ΔP больше или меньше некоторой оптимальной величины $\Delta P_{\text{опт}}$ эффективность работы фильтра уменьшается из-за нарушения целостности фильтрующего пылевого слоя.

Оптимальной величине $\Delta P_{\text{опт}}$ соответствует оптимальная продолжительность межрегенерационного периода. Однако промежу-

ток времени между импульсами на регенерацию ($t_{\text{и}}$) можно определить только экспериментально. Для заданного перепада давления на фильтре 900–1200 Па опытным путем были найдены соответствия:

$$\Delta P_{\min} = 900 \text{ Па} \rightarrow t_{\text{и. max}} = 300 \text{ с}; \quad \Delta P_{\min} = 1200 \text{ Па} \rightarrow t_{\text{и. min}} = 60 \text{ с}.$$

Функция $t_{\text{и}} = f(\Delta P)$ при $\Delta P_{\min} \leq \Delta P \leq \Delta P_{\max}$ была найдена из условия, что зависимость $t_{\text{и}}$ от ΔP линейная:

$$t_{\text{и}} = t_{\text{и. max}} - (t_{\text{и. max}} - t_{\text{и. min}}) \cdot \frac{\Delta P - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}. \quad (18.304)$$

При подстановке числовых значений получено:

$$t_{\text{и}} = f(\Delta P) = 1020 - 240 \left(\frac{\Delta P}{300} \right).$$

Таким образом, была получена составная функция для управления величиной $t_{\text{и}}$:

$$t_{\text{и}} = f(\Delta P) = \begin{cases} t_{\text{и. min}} = 60 & ; \Delta P > 1200 \\ 1020 - \frac{240 \cdot \Delta P}{300}; & 900 \leq \Delta P \leq 1200 ; \Delta P, \text{ Па}; t, \text{ с}; \\ t_{\text{и. max}} = 300 & ; \Delta P < 900 \end{cases}.$$

Если $t_{\text{и}}$ в мин, то получено:

$$t_{\text{и}} = f(\Delta P) = \begin{cases} t_{\text{и. min}} = 1 & ; \Delta P > 1200 ; \\ 17 - \frac{4 \cdot \Delta P}{300}; & 900 \leq \Delta P \leq 1200; \quad \Delta P, \text{ Па}; t, \text{ мин}; \\ t_{\text{и. max}} = 5 & ; \Delta P < 900 \end{cases}.$$

Функции $t_{\text{и}} = f_{\text{и}}(\Delta P)$ и $\overline{\Delta P}_{\text{м}} = f_{\text{м}}(t)$ были применены для определения:

- 1) промежутка давлений при эффективной работы фильтра;
- 2) оптимального давления $\Delta P_{\text{опт}}$ (из оптимального промежутка), которое будет поддерживаться в фильтре.

В общем случае при $\Delta P_M = a + \epsilon \cdot t \neq \overline{\Delta P}_M$. Здесь $a = C_A A_M \mu w$; $\epsilon = C_B A_{II} \mu Z w^2$. Границы давлений эффективной работы фильтра определяются по формулам:

$$1) \text{ нижняя граница: } t = t_{и.мин} = 1 \text{ мин} \Rightarrow \Delta P(1) = a + \epsilon \cdot 1;$$

$$2) \text{ верхняя граница: } t = t_{и.макс} = 5 \text{ мин} \Rightarrow \Delta P(5) = a + \epsilon \cdot 5.$$

Оптимальное давление, которое система автоматики будет поддерживать в фильтре, определится из системы:

$$\begin{cases} \Delta P_M = a + \epsilon \cdot t, \text{ откуда } t = \frac{\Delta P_M - a}{\epsilon}; \\ t = 17 - \frac{4\Delta P}{300}; \end{cases} \quad (18.305)$$

$$\frac{\Delta P - a}{\epsilon} = 17 - \frac{4\Delta P}{300}; \quad \Delta P \left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{75} \right) = 17 + \frac{a}{\epsilon};$$

$$\Delta P \cdot \frac{75 + \epsilon}{75 \cdot \epsilon} = \frac{a + 17 \cdot \epsilon}{b} \Rightarrow \Delta P_{опт} = 75 \cdot \frac{a + 17 \cdot \epsilon}{75 + \epsilon}.$$

В общем случае промежуток времени ($t_{и}$) между импульсами на регенерацию при $\Delta P = a + \epsilon \cdot t$ и использовании формулы (18.304) равен:

$$t_{и} = t_{и.макс} - (t_{и.макс} - t_{и.мин}) \cdot \frac{(a + \epsilon \cdot t) - \Delta P_{мин}}{\Delta P_{макс} - \Delta P_{мин}}.$$

Подставляя значения $\Delta P_{макс}$, $\Delta P_{мин}$, $t_{и.макс}$, $t_{и.мин}$, рекомендованные производителями газоочистного оборудования для системы управления регенерацией рукавных фильтров сухой газоочистной установки 6 серии электролизного цеха Богословского алюминиевого завода при $\Delta P = \Delta P_{опт}$, получили:

$$\begin{aligned} t_{и(опт)} &= 17 - \frac{4 \cdot \Delta P}{300} = 17 - \left(\frac{4}{300} \right) \cdot 75 \cdot \frac{a + 17 \cdot \epsilon}{75 + \epsilon} = \\ &= \frac{17 \cdot (75 + \epsilon) - (a + 17 \cdot \epsilon)}{75 + \epsilon} = \frac{1275 + 17 \cdot \epsilon - a - 17 \cdot \epsilon}{75 + \epsilon}; \end{aligned}$$

$$t_{и(опт)} = \frac{1275 - a}{75 + \epsilon}. \quad (18.306)$$

В случае, когда $\Delta P \neq \Delta P_{опт}$, используется составная функция, т. е. зависимость промежутка времени между импульсами на регенерацию от перепада давления в фильтре и функция: $\Delta P = a + \epsilon \cdot t$. Таким образом, линейная зависимость перепада давления в фильтре от времени использована при разработке алгоритмов и программ управления.

Алгоритмы и программы автоматического управления и создание АСУ ТП регенерации рукавных фильтров

Для разработки алгоритмов программ автоматического управления системы управления регенерацией рукавных фильтров была использована разработанная модель [18.228; 18.229]:

$$t_{и} = f_{и}(\Delta P) = \begin{cases} t_{и, \min} = 60; & \Delta P > 1,2 \\ t_{и, \max} - (t_{и, \max} - t_{и, \min}) \cdot \frac{\Delta P - \Delta P_{\min}}{\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}}; & 0,9 \leq \Delta P \leq 1,2 \\ t_{и, \max} = 300. & \Delta P < 0,9. \end{cases} \quad (18.307)$$

Здесь – время t в с; перепады давления ΔP в кПа.

Эта модель выражает зависимость промежутка времени между импульсами на регенерацию от перепада давления в фильтре.

Также используется функция: $\Delta P = a + \epsilon \cdot t$, т. е., линейная зависимость перепада давления в фильтре от времени. Модель $t_{и} = f_{и}(\Delta P)$ представлена графически на рис. 18.132.

Максимальный и минимальный интервал между импульсами, а также минимальное и максимальное значения перепада давления задаются в соответствии со значениями рекомендуемыми поставщиками газоочистного оборудования или значениями, найденными опытным путем при эксплуатации газоочистного оборудования. При текущем перепаде давления меньше минимального заданного значения перепада давления 1 интервал между импульсами равен максимальному заданному интервалу между импульсами. При текущем перепаде давления больше максимального заданного значе-

ния перепада давления 3 интервал между импульсами равен минимальному заданному интервалу между импульсами. Когда текущий перепад давления больше минимального заданного значения перепада давления и меньше максимального заданного значения перепада давления 2, то расчет интервала между импульсами проводится по формуле (18.304).

Так как для поддержания требуемого уровня очистки электролизных газов необходимо наличие некоторого пылевого слоя на рукавных фильтрах, то применение данного способа позволит поддерживать этот слой. При большем перепаде давления – пыли много – регенерация будет производиться чаще, пыль будет сбиваться. При меньшем перепаде – пыли мало – регенерация будет производиться реже, пыль будет осаждаться на фильтрующей перегородке.

Длительность регенерирующего импульса равна 500 миллисекундам.

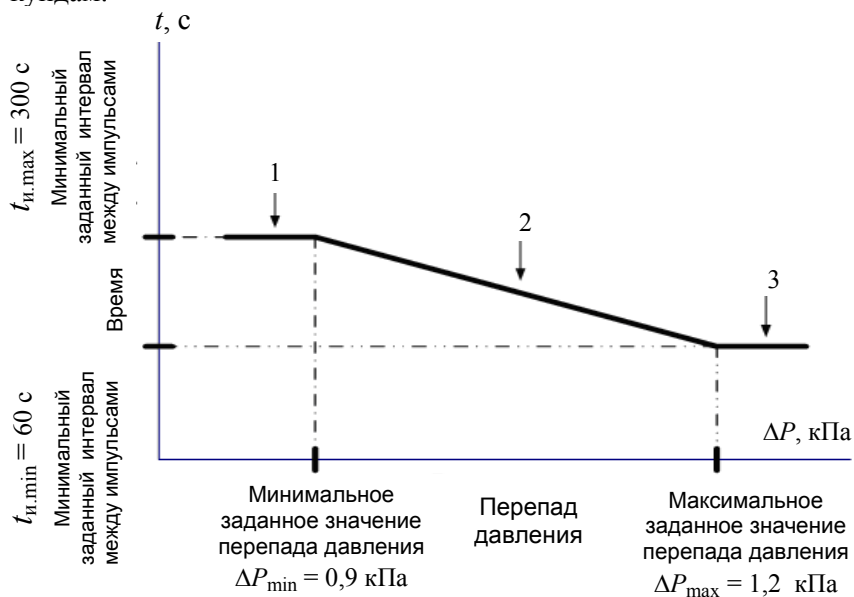


Рис. 18.132. График регулирования промежутка между импульсами в зависимости от перепада давления на рукавном фильтре

Временные интервалы процессов диагностики системы управления регенерацией рукавных фильтров по наличию токового им-

пульса, передаваемого на катушку соленоида и падению давления в ресивере выбраны по следующим причинам:

1. Токовый импульс – так как длительность импульса равна половине секунды, имеет смысл проверять импульс тока силовой цепи в течение 400 миллисекунд. По величине он равен 24 В.

2. Падение давления на ресивере имеет смысл фиксировать после регенерирующего импульса, как было найдено опытным путем, максимальные падения давления были зафиксированы на графиках в течение 1–1,5 с после импульса. Поэтому падение давления имеет смысл проверять в течение 2 с.

В результате реализации алгоритмов программ автоматического управления и диагностики системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров была создана САУ регенерацией рукавных фильтров.

Выделено 3 режима, в которых может находиться система:

1) «сервис» – отключена регенерация, включение каналов возможно только нажатием на соответствующую кнопку в верхней части экрана;

2) «циклический» – режим регенерации с заданной длительностью импульса, паузы;

3) «автоматический по перепаду давления на фильтре» – режим регенерации с заданной длительностью импульса и вычисляемой по графику паузой между импульсами. Этот режим является основным.

Энергоэкологический анализ процесса удаления газов при электролизе Al

Был проведен энергоэкологический анализ процесса удаления газов при электролизе алюминия с использованием системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров, в соответствии с методикой полного (сквозного) энергоэкологического анализа, разработанного в УрФУ под руководством В. Г. Лисиенко [18.1].

До 2004 г. электролизные газы удалялись через дымовые трубы вентиляторами ОВ – 2600 без очистки. В июле 2004 г. на Богословском алюминиевом заводе при участии С.А. Зотова был осуществлен пуск установки сухой очистки газов на 6-ой серии. Электролизные газы от корпусов 5, 6 электролизного цеха поступают по магистральным газоходам в установку сухой очистки газов и на ней распределяются по 24 модулям «Реактор – рукавный фильтр».

В рамках разработанных методик [18.1] энергетические затраты, учитывающие потребление энергии, материалов на единицу выпускаемой продукции рассчитываются в форме технологических топливных чисел (ТТЧ) в кг условного топлива.

Энергетические затраты, связанные с погашением стоимости экологического ущерба от вредных выбросов на единицу выпускаемой продукции, рассчитываются с помощью технологических экологических чисел (ТЭЧ) в кг условного топлива.

Суммарные энергозатраты учитывают потребление энергии, материалов и погашение стоимости экологического ущерба на единицу выпускаемой продукции в килограммах условного топлива [18.1]

$$\text{ТТЭЧ} = \text{ТТЧ} + \text{ТЭЧ} \text{ кг у.т./ед. прод.}$$

Были получены результаты энергоэкологического анализа процессов удаления электролизных газов с использованием системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров.

Для сравнения представлены табл. 18.27 и на её основе гистограмма, см. рис. 18.133.

Как следует из табл. 18.27 суммарные энергозатраты на электролиз 1 т алюминия и энергозатраты на погашение экологического ущерба от загрязнения окружающей среды без газоочистки $(\text{ТТЭЧ})_1$ существенно превышают суммарные энергетические затраты с газоочисткой $(\text{ТТЭЧ})_2$:

$$\frac{(\text{ТТЭЧ})_1}{(\text{ТТЭЧ})_2} = \frac{13553,5}{7709,3} = 1,76.$$

С газоочисткой энергозатраты, учитывающие потребление электроэнергии, получились несколько больше и соответственно больше получена величина ТТЧ:

$$\frac{(\text{ТТЧ})_2}{(\text{ТТЧ})_1} = \frac{6507,7}{5903,4} = 1,102.$$

В тоже время энергозатраты, учитывающие погашение экологического ущерба, снизились в 6,367 раза:

$$\frac{(\text{ТЭЧ})_1}{(\text{ТЭЧ})_2} = \frac{7650,1}{1201,6} = 6,367.$$

Таблица 18.27

Сравнение результатов энергоэкологического анализа

Показатели	Процесс удаления электролизных газов			
	1. Без газоочистки		2. С автоматизированным комплексом газоочистки	
	кг у.т./т алюминия	% от ТТЭЧ	кг у.т./т алюминия	% от ТТЭЧ
ТТЧ	5903,4	43,56	6507,7	84,41
ТЭЧ	7650,1	56,44	1201,6	15,59
ТТЭЧ	13553,5	100	7709,3	100

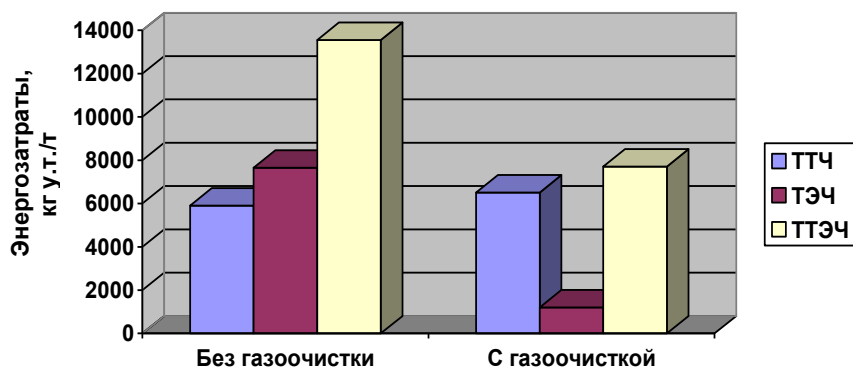


Рис. 18.133. Сравнительные показатели ТТЧ, ТЭЧ и ТТЭЧ

Это и привело к снижению суммарных энергозатрат на электролиз 1 т алюминия и на удаление электролизных газов с использованием системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров в процессе газоочистки.

Таким образом, в данной работе получены следующие результаты.

1. В результате проведенного анализа математических моделей, определены условия их применения для улавливания мелкодисперсных пылей алюминиевого производства на рукавных фильтрах.

2. Сопоставительный анализ экспериментальных данных процесса улавливания мелкодисперсных пылей и соответствующих модельных расчетов выявил возможность применения модифицированной модели Мандрико и Пейсахова при решении задач автоматического управления рукавными фильтрами. На ее основе

разработана математическая модель зависимости периода между регенерациями рукавных фильтров от перепада давления на них.

3. Алгоритмы автоматического управления и диагностики регенерации рукавных фильтров целесообразно создавать на основе предложенной модели зависимости периода между регенерациями рукавных фильтров от перепада давления на них.

4. На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение автоматического управления и диагностики регенерации рукавных фильтров.

5. Предложено техническое обеспечение системы автоматического управления технологическим процессом регенерации рукавных фильтров.

6. Разработанная система автоматического управления технологическим процессом регенерации рукавных фильтров была внедрена в АСУ ТП сухой газоочистной установки ОАО «БАЗ – СУАЛ».

7. Внедрение разработанной системы позволило улучшить условия эксплуатации оборудования рукавных фильтров за счет «гибкости» программы реализующей алгоритм управления процессом регенерации фильтров и точности отработки программой, устанавливаемых интервалов времени (длительность импульсов, пауза между импульсами).

8. Внедрение разработанной системы позволило упростить обслуживание электрооборудования посредством совмещения в одной системе функций управления приводами встряхивания, постоянной диагностики и контроля состояния оборудования, контроля технологического процесса регенерации с выдачей удобных для восприятия цифробуквенных сообщений о его текущем состоянии на дисплей панели оператора и визуализация процесса на мониторах АРМа оператора; повысить комфортность работы оператора и быструю перенастройку системы управления регенерацией фильтров при изменении технологических параметров газоочистки.

9. Проведенный энергоэкологический анализ процесса удаления газов при электролизе алюминия с использованием системы автоматического управления регенерацией рукавных фильтров показал, что пуск в работу автоматизированного комплекса сухой очистки газов на 6-й серии снизил энергозатраты, учитывающие погашение экологического ущерба, в 6,4 раза.

18.7.5. Система управления тепловым режимом в комплексе «печь автогенной плавки — котел-утилизатор»

Разработанная В. Г. Лисиенко совместно с Г.К. Маликовым система управления может быть использована при выплавке медного штейна в печах автогенной плавки, в частности, в печах Ванюкова [18.233].

Были известны системы управления тепловым режимом в печах автогенной плавки, работающих в комплексе с котлом-утилизатором. При этом управляющим воздействием для коррекции теплового режима является соотношение «массовый расход шихты – расход кислородно-воздушной смеси» (шихта/кислород). При увеличении или уменьшении по условиям плавки расхода шихты соответственно увеличивается или уменьшается расход кислородно-воздушной смеси (КВС) в ванну. При этом расход КВС рассчитывается при заданной среднебалансовой концентрации серы в шихте, определяемой методом материального баланса [18.233; 18.234; 18.235].

Однако недостатком этих систем управления является неучет колебания концентрации серы в шихте при заданном массовом расходе. На рис. 18.134 приведен пример колебаний концентрации серы в шихте печи Ванюкова во времени по данным одного из предприятий [18.236].

Практика работы печи Ванюкова и проведенное математическое моделирование показывают, что при увеличении концентрации серы выше расчетной среднемассовой, неучет колебаний концентрации серы приводит к недостатку кислорода для выгорания серы, выносу недожжённой серы за пределы плавильной ванны в аптейк печи и ее дожиганию в аптейке за счет дополнительно подаваемого кислорода на дожиг. Это, в свою очередь, приводит к увеличению температуры отходящих газов на входе в котел-утилизатор до температуры 1400–1500 °С и выше.

Эти недопустимые по установленным техническим условиям работы котла-утилизатора превышения температуры отходящих газов приводят к резкому увеличению тепловых потоков на поверхности котла и, соответственно, температур этих поверхностей. Возникают аварийные ситуации при прогаре тепловоспринимающих поверхностей в радиационной и конвективной зонах котла-утилизатора. Эти ситуации особенно опасны в связи с попаданием воды на ванну печи, что приводит к хлопкам и даже взрывам с разрушением конструкций и угрозой для жизни обслуживающего персонала.

Кроме того, в случае недостатка кислорода в ванне печи при увеличении содержания серы в шихте нарушаются условия стабильного протекания технологического процесса. Это приводит к тепловому дисбалансу ванны печи, снижению тепловой эффективности и производительности. Дожигание серы над ванной и в аптечке приводит к ухудшению стойкости элементов самой печи.

Однако недостатком этой системы являлось не учет колебаний концентрации серы в используемой для плавки шихте, что нарушает стабильное протекание технологического процесса. Это приводит к снижению тепловой эффективности и производительности печи, ухудшению стойкости элементов печи и котла-утилизатора, возникновению аварийных ситуаций.

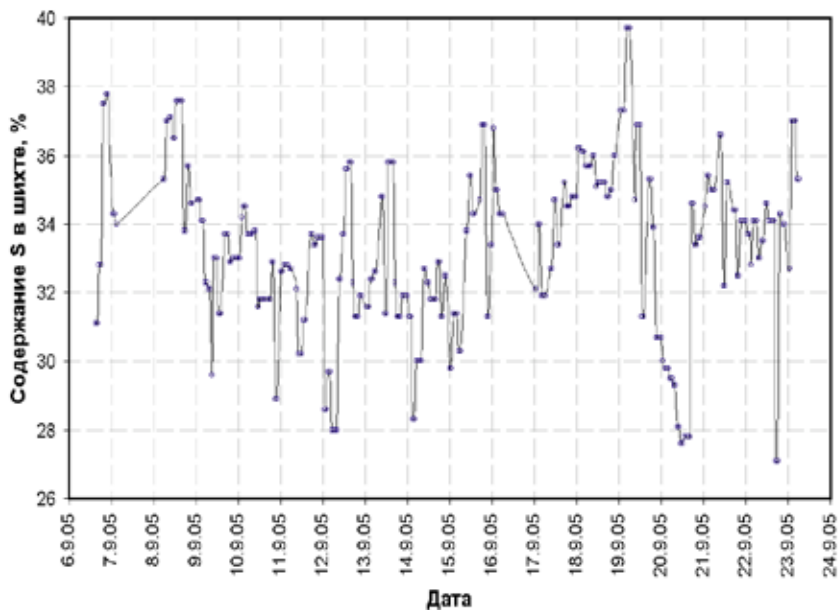


Рис. 18.134. Изменение концентрации в шихте печи Ванюкова во времени

Задачей разработанной системы управления являлся учет колебаний концентрации серы в используемой шихте, увеличение производительности печи, повышение стойкости элементов печи и котла-утилизатора и предотвращение таким образом аварийных ситуаций в комплексе «печь автогенной плавки – котел-утилизатор».

Эта задача решалась следующим образом.

Система управления тепловым режимом в комплексе «печь автогенной плавки — котел-утилизатор», включающая в себя устройство подачи шихты, расходомер шихты, фурмы для ввода кислородно-воздушной смеси (квс) под ванну, расходомер КВС, надванное пространство печи, термопару на границе между пароиспарительной и конвекционной зонами, регулятор соотношения шихта/кислород, устройство ввода охлаждающей воды в аптейк печи, расходомер охлаждающей воды, отличается тем, что дополнительно устанавливается регулятор, корректирующий соотношение шихта/КВС, при этом входной величиной данного корректирующего регулятора является температура датчика-термопары, установленной на границе между пароиспарительной и конвективной зонами котла-утилизатора, а управляющим воздействием является скорректированный в соответствии с показаниями термопары расход КВС.

Система также отличается тем, что дополнительно устанавливают регулятор температуры, при этом управляющим воздействием является подача охлаждающей воды в апейк печи перед котлом-утилизатором.

При этом уставка задатчиков корректирующего регулятора и регулятора температуры установлена в пределах 700–800 °С.

В системе установлен переключатель связи датчика температуры с корректирующим регулятором и регулятор температуры для переключения датчика температуры с корректирующего регулятора соотношения шихта/КВС на регулятор температуры по охлаждающей воде и обратного переключения.

При этом очевидно, что непосредственное использование в качестве регулирующего параметра собственно концентрации серы в шихте в реальном времени затруднено из-за сравнительно длительного процесса анализа содержания серы, появлением в связи с этим значительного запаздывания в системе регулирования и увеличением колебаний по выносу недожженной серы над ванной печи.

Таким образом, представительным регулируемым параметром в этой ситуации, непосредственно отражающим режим выноса серы и ее дожигания в аптейке, являются температура отходящих газов в аптейке и на входе котла-утилизатора. Однако из-за наличия высоких температур и значительной запыленности отходящих газов

в этих зонах невозможно добиться приемлемой для непрерывного автоматического регулирования стойкости термопар при их размещении на входе в котел-утилизатор. В то же время установка термопары на границе между пароиспарительной и конвективной зонами котла-утилизатора отражает достаточно представительную информацию о температурном режиме и обеспечивает, как показывает практика, длительную стабильную работоспособность и эксплуатацию термопары. Проведение расчетов и математическое моделирование показало, что при проектной температуре на входе в котел-утилизатор отходящих газов 1300–1350 °С температура на границе между его пароиспарительной и конвективной зонами составляет 700–800 °С, что и принято в качестве уставки для регуляторов температуры. Превышение этой температуры свидетельствует о росте температуры отходящих газов на входе в котел-утилизатор и вероятности аварийных ситуаций, температура ниже этого диапазона приводит к тепловой недогрузке котла и снижению его паропроизводительности. Основой предлагаемой системы управления является установка корректирующего регулятора с датчиком-термопарой на границе пароиспарительной и конвективной зон котла-утилизатора, что обеспечивает корректировку соотношения шихта/КВС в случае колебания концентрации серы в шихте относительно средних значений и предотвращает возможность возникновения аварийных ситуаций.

Подстраховочным элементом системы управления является дополнительная подсистема с регулятором температуры и регулирующим воздействием в виде подачи охлаждающей воды в аптейк печи. Её подключение к регулированию температуры котла-утилизатора происходит в случае исчерпания возможностей по снижению температуры в котле за счет корректирования соотношения шихта/КВС вследствие достижения максимального значения расхода кислорода. Подача охлаждающей воды является именно запасным вариантом, так как при этом имеют место значительно неравномерные поля температур на входе в котел и снижение его тепловой эффективности.

Для реализации этой запасной подсистемы управления установлен сигнализатор достижения максимального расхода КВС

в процессе регулирования температуры и связанного с ним переключателя на подсистему регулирования температуры по расходу охлаждающей воды. Также установлен сигнализатор поддержания температуры в заданном пределе 700–800 °С.

Устройство данной системы на характерном примере печи автогенной плавки — печи Ванюкова — представлено на рис. 18.135. Она включает в себя рабочее пространство печи 1, котел-утилизатор 2, плавильную ванну 3 с выпуском шлака ШЛ и штейна ШТ, надванное пространство 4, аптейк печи 5, радиационную зону котла-утилизатора 6, пароиспарительную зону котла-утилизатора 7, нисходящие и восходящие звенья 8 и 9, части конвективной зоны, устройство подачи шихты 10, устройство ввода шихты в рабочее пространство и ванну печи 11, коллектор подачи квс 12, кислородно-воздушные фурмы 13, коллектор подачи охлаждающей воды 14, регулирующий орган подачи воды 15, форсунки для ввода воды в аптейк печи 16, датчик расхода кислородно-воздушной смеси (КВС) 17, датчик расхода шихты 18, датчик температуры на границе пароиспарительной и конвективной зон котла-утилизатора 19, регулятор соотношения шихта/квс 20, расходомер шихты 21, корректирующий регулятор соотношения шихта/квс по температуре в котле-утилизаторе 22, расходомер КВС 23, исполнительный механизм регулирования расхода КВС 24, регулирующий орган расхода КВС 25, сигнализатор максимального расхода КВС 26, регулятор температуры в котле-утилизаторе по расходу охлаждающей воды 27, исполнительный механизм расхода охлаждающей воды 28, датчик расхода воды 29, расходомер воды 30, переключатель корректирующего регулятора соотношения шихта/квс на регулятор температуры по расходу охлаждающей воды 31, вторичный прибор по температуре 32, сигнализатор установления температуры в пределах задания 700–800 °С 33.

Обозначения: Ш – шихта, КВС – кислородно-воздушная смесь, ОВ – охлаждающая вода, ОГ – отходящие газы, ШЛ – шлак, ШТ – штейн, Со – соотношение, С – регулятор, G – расход, IR – прибор показывающий и записывающий, T – температура, кор – корректирующий регулятор, КВС – кислородно-воздушная смесь.

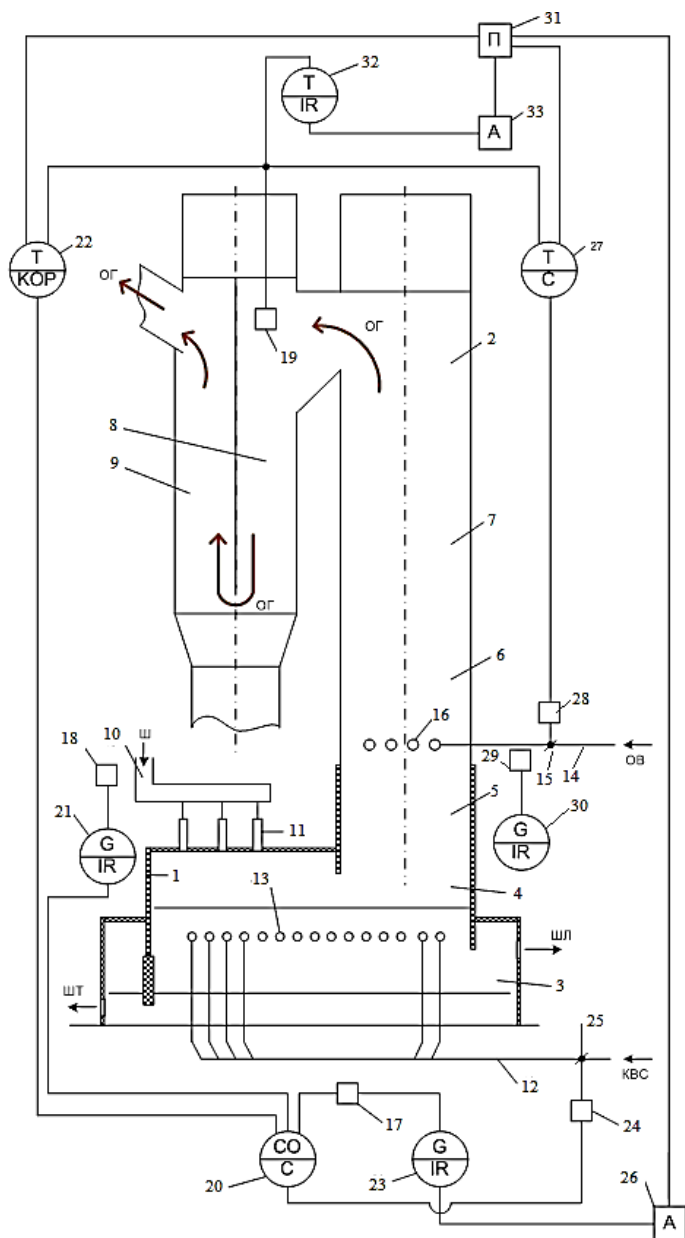


Рис. 18.135. Система управления тепловым режимом
в комплексе «Печь Ванюкова - котел-утилизатор»

Устройство работает следующим образом. В рабочее пространство печи 1 через надванное пространство 4 в ванну печи 3 подается шихта. При этом используется устройство подачи шихты 10 и отдельные шихтоподающие устройства 11. В рабочее пространство 1, в частности, в ванну печи 3 подается кислородно-воздушная смесь (КВС) через коллектор 12 и фурмы 13. К аптейку печи подведен также коллектор охлаждающей воды 14 и установлены форсунки для ввода воды 16. Соотношение шихта/КВС обеспечивается регулятором соотношения 20 с использованием датчиков расхода шихты 18 и расхода КВС 17, расход КВС измеряется расходомером 23, расход шихты измеряется расходомером 21. Температура котла-утилизатора на границе пароиспарительной и конвективной зон измеряется термопарой 19. Выход термопары 19 соединен с входом корректирующего регулятора 22, который корректирует задание регулятору соотношения 20 при отклонении заданной температуры в корректирующем диапазоне 700–800 °С. Выход расходомера КВС 23 соединен с входом сигнализатора 26, который срабатывает при достижении максимально возможного расхода КВС и обеспечивает переключение корректирующего регулятора 22 на регулятор температуры 27. Регулятор температуры 27 через исполнительный механизм 28 и регулирующий орган 15 обеспечивает регулирование температуры уже за счет подачи охлаждающей воды. Выход термопары 19 соединен с входом вторичного прибора 32, снабженным сигнализатором 33. При установлении температуры в пределах задания 700–800 °С сигнализатор 33 переключает регулятор температуры 27 обратно на корректирующий регулятор 22 и в обычном режиме регулирование температуры в котел-утилизатор осуществляется с использованием корректирующего регулятора 22 и регулятора соотношения 20.

Предлагаемая система может быть применена и на плавильных печах черной металлургии, работающих в режиме ПЖВ (плавка в жидкой ванне), в частности, при выплавке чугуна в печах типа РОМЕЛТ, снабженных котлом-утилизатором. При этом обеспечивается стабилизация работы печи и котла-утилизатора при колебании содержания углерода в применяемом восстановителе.

Таким образом, использование данной системы управления обеспечивает стабильное протекание процессов плавления шихты в печах автогенной плавки, учитывает колебания концентрации серы в шихте, увеличивает стойкость и теплоэффективность работы печи и котла-утилизатора, предотвращает аварийные режимы работы комплекса печь автогенной плавки – котел-утилизатор.

18.8. Контроль, диагностика, автоматизация и уточненные методы расчета в нагревательных устройствах

Данный параграф посвящен исследовательским и внедренческим работам в области контроля, диагностики и автоматизации применительно к нагревательным устройствам.

В первую очередь, в силу особой направленности работ автора это касается нагревательных и термических печей. Кроме того, работы под руководством или при участии авторов были проведены на ряде других установках, так или иначе связанных с нагревом или термообработкой.

При проведении этих работ большой вклад был внесен коллегами авторов по УГТУ-УПИ (УрФУ): В.В. Волковым, А.Л. Гончаровым, Ю.К. и Г.К. Маликовыми, Ю.В. Крючковым, А.В. Саплиным, Б.А. Фетисовым, А.А. Константиновым, И.Ю. Медведевым, А.П. Скуратовым, В.В. Еголаевым, К.А. Сургановым, А.А. Титаевым, В.П. Зайцевым.

В основном данные исследования и работы проводились в рамках УГТУ-УПИ (УрФУ). Также следует отметить работы в содружестве с НИИ металлургической теплотехники – ВНИИМТ (Ю.И. Ляпунов, К.Ю. Эйсмонт, Д.В. Завгороднев, Е.Н. Некрасова), Уральским государственным горным университетом (Б.Б. Зобнин), Киевским институтом автоматики (А.П. Гончаров, И.М. Резник, Л.Л. Прядкин).

Как отмечено в п. 18.1, ряд проблем при рассмотрении конструкций и тепловых режимов, связанных с автоматизацией и диагностикой при нагреве коротко был рассмотрен в предыдущих изданиях автора [18.1–18.3]. В данном параграфе некоторые из этих проблем будут даны в более развернутом представлении.

18.8.1. Форсирование тепловых работ проходной нагревательной печи и оптимальное управление тепловым режимом

Проходные, как правило, многозонные нагревательные печи (печи с движущимся металлом) относятся к классу наиболее производительных печей.

Многозонные печи для нагрева металла, работающие в одной технологической линии с прокатными станами, часто меняют свою

производительность вследствие неравномерной работы прокатного оборудования, а также изменения сортамента нагреваемого металла. Поэтому для обеспечения постоянства теплосодержания и оптимизации экономических показателей нагрева необходимо изменять тепловую нагрузку по зонам печи в соответствии с параметрами заготовок, скоростью их продвижения через печь и имеющимся расположением отдельных партий в печи.

Оптимальный режим нагрева для многозонных печей с движущимся металлом – комплексное понятие, определяющееся технологическими (температура металла на выдаче из печи при заданной неравномерности нагрева по сечению) и экономическими (минимальные удельный расход топлива и потери от окисления) факторами. Необходимо отметить, что технологические факторы являются важнейшими при формулировании требований к нагреву, отклонение приводит к массовому браку, поэтому их выполнение строго обязательно. Для каждого прокатного агрегата они имеют свои определенные значения, а кроме того, зависят и от марки стали. Среди экономических факторов, определяющих оптимальных нагрев, можно выделить два основных: расход топлива и окисление металла. На сегодняшний день отдать предпочтение одному из них очень сложно, так как в литературе существуют различные мнения, склоняющиеся и к одному, и к другому фактору. В работах автора проблемам, связанным с окислением металла, уделено определенное внимание.

Вопросам оптимального управления нагревом металла посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ. Среди отечественных авторов отметим работы А.Г. Бутковского, Э.М. Гольдфарба, Н.Ю. Тайца, С.А. Малого, А.Х. Вyrка, Е.И. Казанцева, В.А. Маковского, Л.А. Бровкина и др.

Проблемы автоматизации нагревательных печей в постановке автора с коллегами вплотную увязываются с моделированием процессов нагрева при использовании самых современных методов (в том числе многозональных методов, динамического зонально-узлового метода, как неотъемлемого элемента имитационно-прогнозирующего уровня ТАСУ (см. [18.1] и п. 18.2).

Работы авторов с коллегами в данном направлении были проведены на Первоуральском новотрубном (ПНТЗ), Оскольском электрометаллургическом заводе, на Мариупольском заводе имени Ильича и ряде других заводов в период, когда проблемы увеличения произ-

водительности агрегатов и экономии топлива при одновременном повышении качества металла становились очень остро. При этом производительность прошивных и прокатных станов качество проката (в частности, это прошивной стан на ПНТЗ) часто лимитировались условиями тепловой работы нагревательных устройств, например, на кольцевой печи для нагрева трубной заготовки.

Для этого класса систем можно определить следующие основные функции высшего третьего – прогнозирующего и поддерживающего уровня (имитационно-оптимизирующего блока), представленного многозональными математическими моделями, рассмотренными в [18.1]:

1. Проектирование самой печи, определение ее основных конструктивных и режимных параметров.

2. Определение оптимальных траекторий нагрева.

3. Проведение оптимизационных процедур по другим параметрам теплового режима (длина факела, коэффициенты расхода воздуха и т. д.).

4. Оценка представительных точек размещения датчиков температуры в зонах печи.

5. Проведение вычислительной идентификации модели управляющего контура.

6. Определение длины переходного участка (буферной или резервной зон) нагревательного устройства, обеспечивающего возможные переходы с минимальными потерями в динамическом режиме от одной траектории нагрева на другую, и определение других условий поведения системы в динамическом режиме (динамическая оптимизация).

Данная работа проведена под руководством авторов отмеченных выше коллег при активном участии и содействии сотрудников ряда предприятий, в том числе Первоуральского новотрубного завода [18.1–18.3; 18.15; 18.16; 18.24; 18.25; 18.237–18.258].

Работа проводилась при постоянном сопровождении проводимых исследований многозональным математическим моделированием тепловых режимов [18.1–18.3].

Форсирование тепловой работы и управление тепловым режимом на примере кольцевой нагревательной печи

На рассматриваемой печи требовалось решить задачу увеличения производительности печи на заготовках ШХ15 большого диаметра с доведением производительности до 70 т/ч.

Геометрия и развертка моделей кольцевых печей, применяемых при математическом моделировании, приведены на рис. 18.136 (см. также [18.1–18.3]).

Расчетное прогнозирование определило возможности получения такой увеличенной производительности печи. При этом требовалось на 12,3 % увеличить общую тепловую нагрузку печи при сохранении отношения тепловых нагрузок в I и II зонах печи $B_I/B_{II} \approx 1$. Однако при этом почти на 100 °С увеличивалась температура продуктов сгорания и температура свода и кладки в зонах I и II. Соответственно увеличилась локальная температура в месте установки радиационных пирометров ($t_{p.n}$). Требуемые температуры, задаваемые радиационным пирометром в зонах I и II в этом случае должны были на 60–70 °С превышать допустимые температуры нагрева металла, а также и температуры РП, задаваемые по обычной инструкции. Если в этом случае происходит замедление работы стана и соответственно производительности печи или аварийный останов, то возникает опасность перегрева металла. Именно эта ситуация и привела автора и его сотрудников к мысли о необходимости введения автоматического управления работой печи в случае ее форсированного режима. При ручном управлении, что и применялось на заводе, все внимание сварщика в этом случае сосредотачивается на задаче недопущения перегрева, требуются частые ручные смены заданий регуляторам в зонах, что не всегда можно было своевременно и качественно выполнить.

В условиях частой смены сортамента металла при необходимости форсированного хода печи система автоматизированного управления нагревом, по мнению автора, могла основываться на позонной компенсации возмущений, появляющихся в результате изменения локальной производительности в каждой рабочей зоне печи. При этом целесообразно было применить детерминированный подход к коррекции температурного режима печи в функции производительности, т. е. заранее получить алгоритм указанной инвариантной (разомкнутой по каналу «температура в зоне – производительность») системы автоматического регулирования. Для нахождения такого алгоритма были применены зональные модели печей, с помощью которых были определены локальные температуры в месте установки радиационных пирометров в функции производительности

печи. Эти температуры далее использовались как задания регуляторам при изменении производительности печи. В такой системе управления весьма положительную роль может играть сводовое отопление первых зон печи, обеспечивая дополнительный резерв тепловой мощности, позволяя гибко реагировать на темп проката (см. рис. 18.136, б).

Для обоснования данного положения были проведены как модельные, так и экспериментальные исследования на кольцевых печах.

Тепловые режимы нагрева. Основные факторы, определяющие оптимальные режимы нагрева: технологические и экономические. На эффективность работы многозонной нагревательной печи в первую очередь оказывают влияние время нагрева, расход топлива по зонам печи и геометрические размеры нагреваемых заготовок.

Тепловые режимы нагрева анализировались на зональной математической модели кольцевой печи. В установившемся режиме работы печи тепловой режим нагрева определяет распределение топлива по зонам. Время нагрева и геометрические размеры нагреваемых заготовок – это не что иное, как производительность печи, и она определяется в производственных условиях темпом работы прокатного оборудования, так как из печи выдаются нагретые заготовки по требованию стана. Исходя из этих условий, был проведен поиск оптимального режима нагрева цилиндрических заготовок из очень востребованной стали ШХ15 диаметром 170 мм при общей тепловой нагрузке на печь 31,64 МВт. В табл. 18.28 приведены пять вариантов распределения тепловой нагрузки по зонам печи.

Как следует из табл. 18.28, определенный сдвиг тепловой нагрузки к концу (по ходу металла) рабочего пространства (к зонам IV, V) печи приводит к увеличению производительности P и снижению удельного расхода условного топлива $B_{y, \text{т}}$, однако при этом увеличивается неравномерность нагрева заготовок, которая по требованиям технологии не должна превышать 20 °С. Можно было сделать вывод, что с точки зрения экономии топлива предпочтителен третий вариант распределения тепловой нагрузки (см. табл. 18.28).

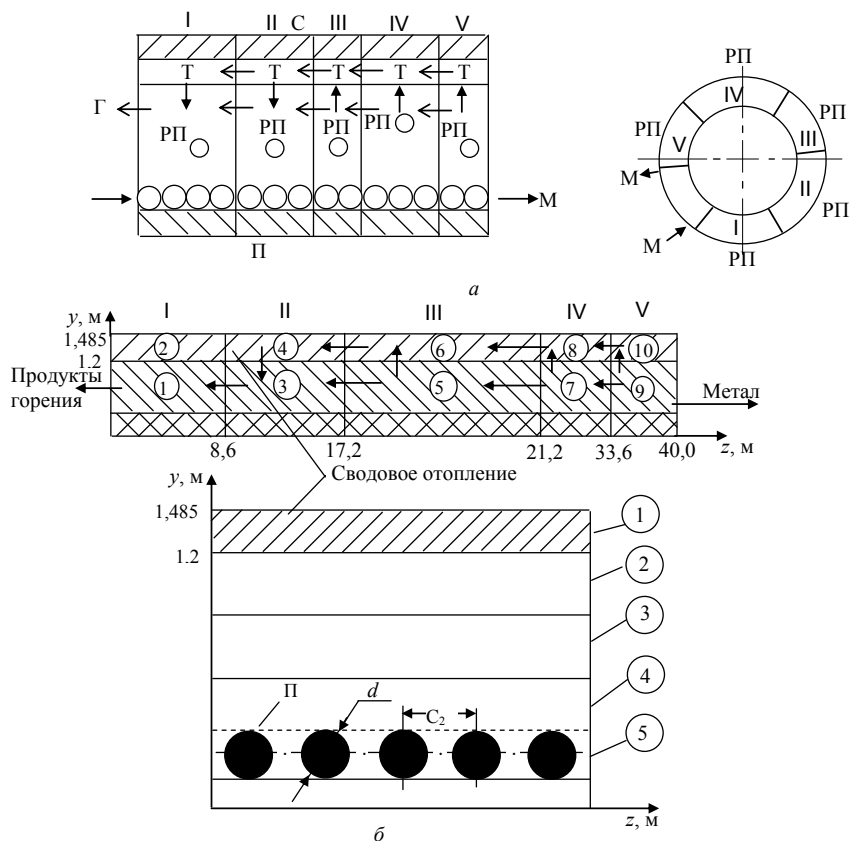


Рис. 18.136. Геометрия кольцевых печей для нагрева трубной заготовки (зональные модели): I–V – рабочие зоны печей; a – движение газов и установка радиационных пирометров (РП); г – продукты сгорания; м – металл; т – подсводовые зоны; п – вращающийся под; РП – радиационные пирометры в рабочих зонах печи; $б$ – модель кольцевой печи со сводовым отоплением в зонах I и II: 1–10 – объемные зоны; п – поверхность заготовок; d и C_2 – диаметр заготовок и расстояние между осями заготовок (Y)

Режимы нагрева, приведенные в табл. 18.28, рассмотрены и с точки зрения минимизации окалинообразования (см. рис. 18.137). При смещении тепловой нагрузки печи к зонам выдержки кривая нагрева металла идет все более полого, но конечная температу-

ра поверхности заготовки не превышает температуры, заданной по технологии. В этих вариантах рост производительности P при сдвиге тепловой нагрузки в сторону выдержки и постоянном расходе топлива на печь равноценен сокращению времени нагрева. Зона максимальных температур также смещается к концу печи. Таким образом, сокращается время пребывания заготовки в печи при температуре интенсивного окисления выше $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. При сдвиге тепловых нагрузок к зоне выдержки, таким образом, должно иметь место уменьшение окалинообразования металла.

Таблица 18.28

Влияние распределения тепловой нагрузки на
производительность печи и качество нагрева заготовок

Вариант	Распределение топлива по зонам печи, %					P , т/ч	Неравно- мерность нагрева, $^{\circ}\text{C}$	$B_{\text{ут}}$, кг/т
	I	II	III	IV	V			
1	40	40	14,3	3,4	2,3	53,0	8	73,3
2	40	37,4	15,6	4,0	2,8	55,0	10	70,7
3	34	37	21	4,4	3,6	57,0	20	68,2
4	31,2	36,1	23,1	5,6	4,0	59,0	24	65,9
5	28,0	31,2	28,3	7,5	5	60,5	30	64,2
P – производительность, $B_{\text{ут}}$ – удельный расход топлива								

Из приведенных данных следует, что предельно допустимый сдвиг тепловой нагрузки к концу печи определяется неравномерностью нагрева металла. Таким образом, на основе физических представлений о тепловой работе многозонной печи с движущимся металлом и определяется стратегия поиска оптимальных режимов нагрева металла. Имея заданное значение величины производительности P , которое в производственных условиях определяет прокатное оборудование, можно задать необходимую тепловую нагрузку для любого известного распределения топлива по зонам, которая обеспечивает нагрев металла до заданной температуры. Если при этом неравномерность поля температуры в сечении заготовки превышает допустимую, то тепловая нагрузка перераспределяется в первые (по ходу металла) зоны печи. При обратной ситуации тепло-

вая нагрузка уменьшается и сдвигается в конец печи. Следуя такой стратегии поиска, можно получать все последующие оптимальные режимы нагрева для различных производительностей печи, геометрических размеров заготовок и марок стали.

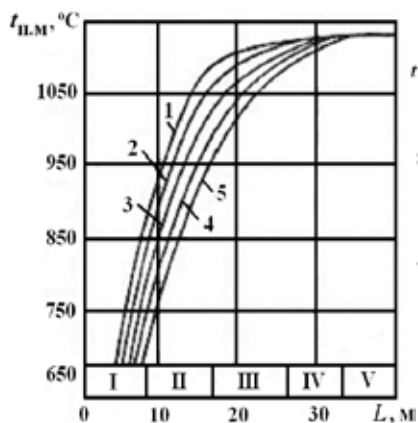


Рис. 18.137. Изменение температуры поверхности металла по длине кольцевой печи при смещении тепловой нагрузки к зонам выдержки (1–5 соответствуют номерам вариантов в табл. 18.28, I–V — теплотехнические зоны печи)

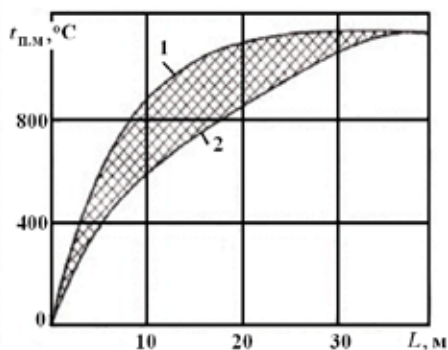


Рис. 18.138. Область роста температуры поверхности металла по длине печи при изменении ее производительности от минимальной (1) до максимальной (2) для заготовок из стали ШХ15 диаметром 170 мм

Многие исследователи придерживались мнения, что рационально вести нагрев по одной оптимальной траектории роста температуры поверхности заготовок. Однако расчеты показали, что для каждого значения производительности P существует своя оптимальная траектория нагрева поверхности металла. Так, на рис. 18.138 показана область изменения температуры поверхности металла, в которой расположены оптимальные траектории нагрева заготовок из стали ШХ15 диаметром 170 мм в условиях работы кольцевой печи стана. Распределение тепловой нагрузки по зонам печи для широкого диапазона изменения ее производительности при нагреве заготовок из стали ШХ15 диаметром 170 мм представлено на

рис. 18.139. Видно, что вклад каждой зоны в тепловую работу печи изменяется с изменением производительности. Например, для первых двух зон по ходу металла тепловая нагрузка изменяется от нуля при $P < 23$ т/ч до 74 % при максимальной производительности (форсированный режим нагрева).

В кольцевой печи нагревались заготовки, диаметр которых изменялся в очень широком диапазоне (105–170 мм). В этом случае сильно сказывается разница в термической массивности нагреваемого металла. В табл. 18.29 представлены три оптимальных распределения топлива по зонам при одинаковой тепловой нагрузке на печь (11,86 МВт) и диаметрах заготовок 170, 140 и 105 мм. Видно, что распределение топлива по зонам печи существенно зависит от диаметра заготовок. При нагреве заготовок диаметром 170 мм в первых двух зонах сжигается 26 % топлива из общего расхода на печь, а при нагреве заготовок меньшего диаметра лучше используется теплота продуктов сгорания, поэтому производительность печи при нагреве этого сортамента при равном расходе топлива на печь выше.

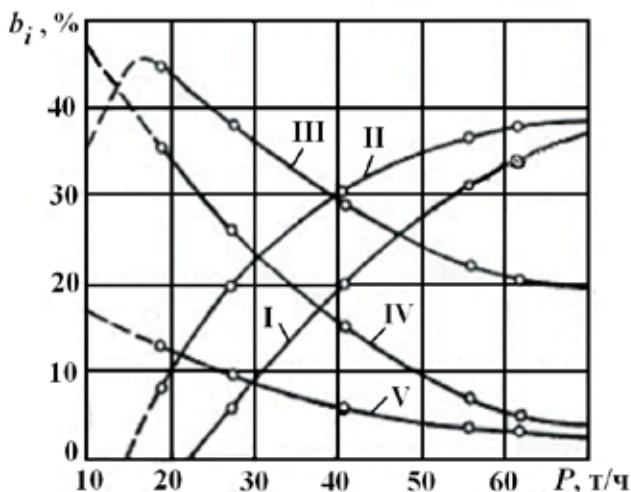


Рис. 18.139. Зависимость распределения топлива по зонам кольцевой печи (I–V) b_i от ее производительности P

$$\left(b_i = V_i^r / \sum_{i=1}^5 V_i^r \cdot 100 \% \right)$$

Таким образом, на характер распределения тепловой мощности печи по ее теплотехническим зонам в первую очередь оказывают влияние производительность печи (время нагрева) и диаметр нагреваемых заготовок. Следовательно, для ведения оптимального режима нагрева в условиях кольцевой печи необходимо было найти зависимость распределения топлива по зонам печи от ее производительности для каждого диаметра нагреваемых заготовок.

Таблица 18.29

Влияние диаметра (термической массивности) заготовок на распределение тепловой нагрузки по длине печи и экономические показатели нагрева

Диаметр заготовки, мм	Распределение топлива по зонам печи, %					P , т/ч	$B_{\text{ут}}$, кг/т	t_{yx} , °C	КПД печи, %
	I	II	III	IV	V				
105	0	10,5	50	31	8,5	30,7	47,5	580	66,9
140	2	18	43	28	9	29,5	49,4	710	64,8
170	6	20	38	26,5	9,5	27,5	53,0	733	60,8

Поиск оптимальных режимов нагрева методом планирования эксперимента. Для выявления эффективности предложенной стратегии поиска оптимального режима нагрева, основанной на физических представлениях о тепловой работе многозонной нагревательной печи с движущимся металлом, проведен поиск оптимального распределения тепловой нагрузки по зонам кольцевой печи методом планирования эксперимента.

Математическая задача формулируется следующим образом. Металл в печи нагревается до среднемассовой температуры t , в то же время необходимо нагреть его таким образом, чтобы неравномерность нагрева по сечению $\Delta t_{\text{сеч}}$ составила 18–20 °C. Эти два выходных параметра печи (t и $\Delta t_{\text{сеч}}$) зависят от следующих факторов: производительности печи x_1 , т/ч; общего расхода газа на печь x_2 , м³/ч; распределения расхода топлива по зонам x_3 , суммарный расход топлива x_4 .

Можно было считать, что алгебраически заданы две функции четырех переменных:

$$\bar{t} = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4);$$

$$\Delta t_{\text{сеч}} = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4);$$

$$x_2 / x_1 = \min.$$

Для решения описанной задачи был применен ортогональный центральный композиционный план эксперимента, позволяющий найти математическую зависимость выходного параметра y (отклика) от перечисленных факторов ($x_1 - x_4$) по экспериментальным данным, полученным в результате специально спланированного (активного) эксперимента. В данном случае имеется в виду вычислительный эксперимент на математической модели кольцевой печи.

Зависимость между выходным параметром y и факторами x_1, x_2, \dots, x_n в общем виде представляется следующим полиномом второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j,$$

где $b_0, \dots, b_i, \dots, b_{ij}$ – коэффициенты полинома.

Для четырехфакторного плана полином примет вид:

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{11} x_1^2 + \\ & + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + \\ & + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4, \end{aligned} \quad (18.304)$$

где коэффициенты находятся по следующим формулам:

$$b_0 = b'_0 + (0,8b_{11}) + (-0,8b_{22}) + (-0,8b_{33}) + (-0,8b_{44});$$

$$b'_0 = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_0 R_k}{25}; \quad b_1 = \frac{\sum_{k=1}^{20} x_{1k} R_k}{20}; \quad b_2 = \frac{\sum_{k=1}^{20} x_{2k} R_k}{20};$$

$$b_3 = \frac{\sum_{k=1}^{20} x_{3k} R_k}{20}; \quad b_4 = \frac{\sum_{k=1}^{20} x_{4k} R_k}{20};$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \left(x_{1k}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{1k}^2 R_k}{25} \right) R_k}{8}; \quad b_{22} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \left(x_{2k}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{2k}^2 R_k}{25} \right) R_k}{8};$$

$$b_{33} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \left(x_{3k}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{3k}^2 R_k}{25} \right) R_k}{8}; \quad b_{22} = \frac{\sum_{k=1}^{25} \left(x_{4k}^2 - \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{4k}^2 R_k}{25} \right) R_k}{8};$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{1k} x_{2k} R_k}{16}; \quad b_{13} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{1k} x_{3k} R_k}{16}; \quad b_{14} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{1k} x_{4k} R_k}{16};$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{2k} x_{3k} R_k}{16}; \quad b_{24} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{2k} x_{4k} R_k}{16}; \quad b_{34} = \frac{\sum_{k=1}^{25} x_{3k} x_{4k} R_k}{16},$$

где x_{ik} – значение фактора в точке плана в абсолютных единицах;

R_k – экспериментальное значение параметра в точке плана в абсолютных единицах.

Поскольку целью настоящего исследования являлось нахождение оптимальных режимов нагрева в широком диапазоне изменения производительности, то в соответствии с этим требованием выбирались соответствующие диапазоны измерения факторов. В табл. 18.30 представлен диапазон рассматриваемых факторов в процессе эксперимента.

Таблица 18.30

Диапазоны изменения факторов в плане эксперимента

Факторы плана	Обозначение фактора	Единица измерения	Диапазон изменений
x_1	P	т/ч	10,9–39,1
x_2	$\sum_{i=1}^V V_{\Gamma}^i$	м ³ /ч	446–1564
x_3	V_{Γ}^{II}	м ³ /ч	99,5–240,5
x_4	$\frac{V_{\Gamma}^{\text{III}}}{\sum_{i=1}^V V_{\Gamma}^i} \cdot 100\%$	%	20,9–49,1
Примечание: $\sum_{i=1}^V V_{\Gamma}^i$ – суммарный расход газа на печь, м ³ /ч; V_{Γ}^i – расход газа в i -й зоне, м ³ /ч.			

В результате анализа расчетных данных, полученных при обработке уравнения регрессии (18.304), было определено оптимальное распределение топлива по зонам печи в широком диапазоне изменения ее производительности.

В качестве примера на рис. 18.140 даны зависимости распределения топлива по зонам печи для заготовок диаметром 105 мм из стали ШХ 15 при поиске оптимального режима нагрева методом планирования эксперимента (штриховые кривые).

Результаты по обоим методикам в определенной мере согласуются.

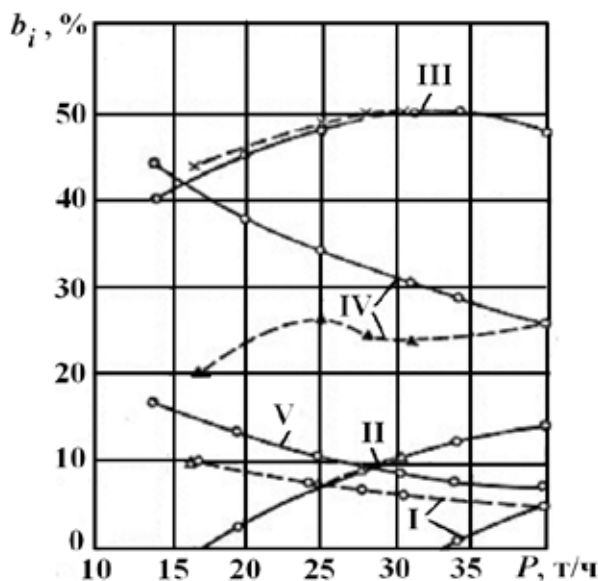


Рис. 18.140. Распределения тепловой нагрузки по зонам печи (I–V) в зависимости от ее производительности, найденные методом физического перебора без учета нижнего предела регулирования зон нагрева (сплошные линии) и методом планирования эксперимента (штриховые линии),

$$b_i = \frac{V_{\Gamma}^i}{\sum_{i=1}^5 V_i^{\Gamma}} \cdot 100\%$$

Представленная методика поиска оптимальных режимов нагрева и используемая математическая модель могут быть полезны не

только технологам при обработке режима нагрева в многозонных нагревательных печах с движущимся металлом, но и конструкторам. Так, можно найти соответствие между длиной печи и толщиной нагреваемых заготовок. На рис. 18.141 представлена зависимость удельного расхода топлива от производительности, и, как видно из рисунка, минимум находится для заготовок диаметром 170 мм при $P \approx 15$ т/ч, для заготовок диаметром 140 мм - при 20 т/ч, для заготовок диаметром 105 мм - при 25 т/ч. Из опыта эксплуатации кольцевой печи следует, что только для заготовок диаметром 105 мм производительность 25 т/ч считается характерной, а для остальных диаметров заготовок характерную производительность приходится увеличивать и тем самым отклоняться от оптимальных значений по удельным расходам топлива.

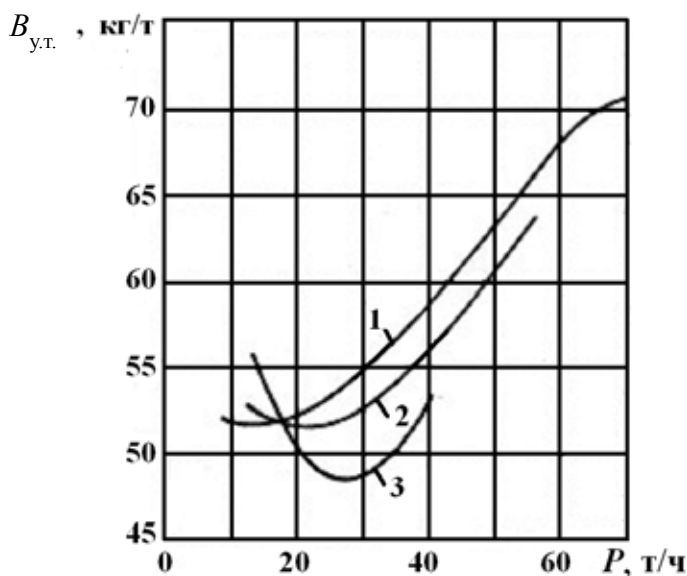


Рис. 18.141. Зависимость удельных расходов топлива $B_{ут.}$ от производительности для заготовок из стали ШХ15 диаметром 170 мм (1), 140 мм (2) и 105 мм (3)

Моделирование нестационарного теплообмена при нагреве и охлаждении заготовок. В практике часто требуется оценивать динамические характеристики при нагреве и охлаждении заготовок.

Применение в зональных расчетах двухэтапного метода или динамического зонально-узлового метода [18.1] позволяет получать различные динамические характеристики моделируемых теплотехнических агрегатов. Эта возможность проиллюстрирована на примере несимметричного нагрева трубной заготовки в условиях кольцевой печи.

Для моделирования переходных процессов в многозонных нагревательных печах, носящих в основном локальный характер, была использована узловая математическая модель участка кольцевой печи, которая представлена в [18.1, рис. 7.19]. При этом применено радиальное разбиение на слои поперечного сечения цилиндрической заготовки. С целью учета влияния аккумуляции и деаккумуляции тепла кладкой на процесс нагрева (охлаждения) совместно с расчетом температурных полей в сечении заготовки рассчитывались температурные поля по толщине свода, стенок и подины печи. Это осуществлялось введением в них узловых точек, для которых рассматривалось одномерное уравнение Фурье, приведенное к точному виду.

Поскольку в производственных условиях тепловое состояние печи оценивается с помощью датчиков температуры (в кольцевой печи – с помощью радиационного пирометра, визированного на карбофраксовый стакан), то в результате решения нестационарной задачи теплообмена должно быть получено изменение температуры поверхности карбофраксового стакана во времени с учетом его местоположения в печи.

В развитие [18.1, уравнение 7.97] локальное значение температуры T_R определялось решением нелинейного алгебраического уравнения теплопередачи и теплового баланса для окрестности точки с бесконечно малой площадью [18.1]:

$$\sum_{i=1}^{n+m} \varepsilon_R f_{Ri} \sigma_0 T_i^4 - \varepsilon_R \sigma_0 T_R^4 + K_{\text{нар}} (T_{\text{нар}} - T_R) + \alpha_R (T_{iR} - T_R) = 0, \quad (18.305)$$

где ε_R – степень черноты поверхности в окрестности точки R ; f_{Ri} – локальный разрешающий коэффициент излучения из точки R на зону i ; $K_{\text{нар}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи через слой материала, Вт/(м²·К); $T_{\text{нар}}$ – температура наружной среды, К; α_R – локальное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

T_{iR} – значение усредненной в направлении по нормали к точке R локальной температуры объемной зоны, соприкасающейся с поверхностью в точке R , К.

Коэффициенты f_{Ri} находились для геометрической модели, изображенной в [18.1, рис. 7.19] с применением вычислительной процедуры, основанной на методе Монте-Карло. Применение уравнения (18.305), описывающего стационарные условия теплообмена, для получения переходного процесса было обусловлено малой инерционностью датчиков температуры по сравнению с инерционностью металла и кладки. Это подтверждается рядом экспериментов, проведенных на кольцевой печи и распространяется на другие типы печей. Таким образом, считая датчик температуры безынерционным, уравнения (18.305) решали в каждый момент времени, причем температуру поверхности металла усредняли пропорционально падающему тепловому потоку (см. рис. [18.1, рис. 7.19, б]).

$$\bar{T} = \sum_{N=1}^{12} K_N T_N.$$

Здесь K_N – коэффициент, определяющий долю падающего теплового потока на элементарную площадку, включающую точку N , от всего потока на заготовку.

Была, в частности, рассмотрена задача оценки скорости охлаждения металла при снижении температуры газовой нагревающей среды. Такой прием снижения температуры необходим при внезапном остове печи.

Вначале определяли величины и скорость сброса температуры греющей среды. Для этого была проведена серия расчетов, при которых величина, «сброса» температуры газа Δt_r изменялась от 0 до 300 °С, а скорость охлаждения $\Delta t_r / \Delta \tau$ – от 0 до 600 °С/мин. Анализ расчетов охлаждения металла показал, что оптимальный сброс температуры находился в пределах 200–250 °С, а скорость сброса температуры — в пределах 50–70 °С/мин.

Для случая охлаждения металла при понижении температуры греющей среды на 300 °С со скоростью 50 °С/мин была рассчитана динамика изменения температуры стенки карбофраксового стакана (см. рис. 18.142). Вычислительные и натурные эксперименты по охлаждению III зоны нагрева кольцевой печи показали, что рассчи-

танные скорости охлаждения печь способна обеспечить, и при этом не происходит нагрев металла в случае внезапной остановки печи.

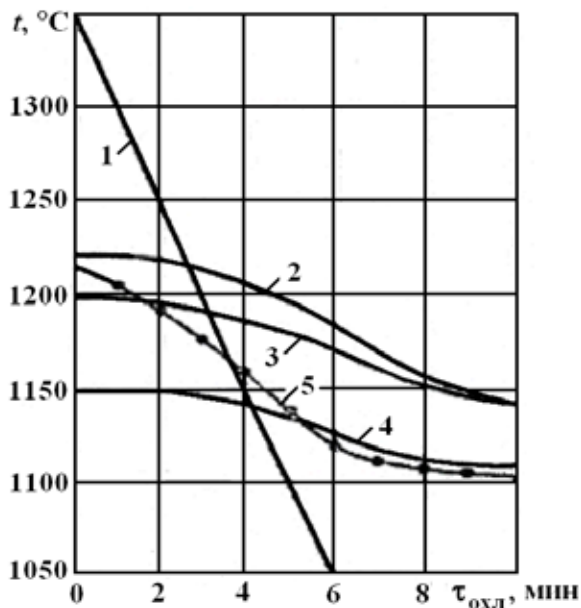


Рис. 18.142. Динамика охлаждения участка кольцевой печи при снижении температуры газа на 300 °С со скоростью 50 °С/мин:

1 – изменение температуры продуктов сгорания; 2, 3 – температура кладки и окалины; 4 – среднемассовая температура металла; 5 – изменение температуры стакана радиационного пирометра

Автоматизированное управление тепловым режимом проходной нагревательной печи. В металлургической промышленности часто встречаются технологические линии, где потребности прокатного стана обеспечиваются одной многозонной проходной нагревательной печью. Поскольку прокатное оборудование работает с переменным темпом, печь также вынуждена постоянно менять свою производительность. Как отмечалось, в этом случае для обеспечения постоянства теплосодержания металла при выдаче из печи, а также оптимизации экономических показателей нагрева необходимо изменять тепловую нагрузку по зонам печи в зависимости от геометрических размеров, марки стали и скорости продвижения

нагреваемых заготовок. Для построения системы управления тепловым режимом проходной нагревательной печи, инвариантной к указанным возмущениям, требуется знание зависимости температуры зон от производительности печи. У многих типов нагревательных печей производительность может изменяться от зоны к зоне, так как геометрические размеры заготовок изменяются. Кроме того, может изменяться марка нагреваемой стали, а следовательно, и температурный режим нагрева. Поэтому необходимо было создавать системы управления, ориентированные на управление тепловым режимом каждой зоны в зависимости от производительности в них и марки стали нагреваемых заготовок. Температурный режим печей контролируется датчиками температуры (термопары или радиационные пирометры), которые установлены в кладке, следовательно, режим нагрева можно выразить как зависимость температуры в точке установки датчика температуры от производительности печи или зоны нагрева (для многозонных нагревательных печей).

Используя зависимости оптимального распределения топлива (см. рис. 18.139), решением системы зональных уравнений на зональной модели печи [18.2, п. 12.4.3] определяли средние для расчетных зон температуры газов, кладки и металла по всей длине печи. В расчетах технологические и экономические требования по оптимизации были соблюдены полностью. Чтобы обеспечить возможность автоматического поддержания оптимальных режимов нагрева заготовок, с использованием понятия локальных характеристик теплообмена с помощью уравнения (18.305) были получены температуры кладки в местах установки датчиков, оценивающих тепловое состояние зоны нагрева (см. рис. 18.143). Такие зависимости получены для всего сортамента нагреваемого металлами (диаметром заготовок 105–170 мм, марки стали ШХ15, 20, 30ХНЗ) и полного диапазона возможного изменения производительности кольцевой печи.

Разработанные с использованием зональных методов математического моделирования соотношения были положены в основу алгоритмов и системы управления тепловым режимом печи при переменном темпе нагрева металла. Способы и системы разрабатывались и защищались как изобретения в совместных работах УрФУ и ВНИПИавтоматпром [18.1; 18.2; 18.16; 18.25; 18.32; 18.45; 18.237–18.242].

Анализ кривых, полученных в результате расчетов (рис. 18.143) показал, что функциональная связь между температурой в каждой зоне регулирования j (рассматривается температура радиационного пирометра $t_{p.пj}$) и ее текущей производительностью P_j может быть описана полиномом вида:

$$t_{p.п.j} = \sum_{k=0,1,2,\dots} a_{jk} P_j^k. \quad (18.306)$$

Здесь индекс k соответствует порядковому номеру члена полинома, величина a_{jk} определяются при аппроксимации зависимостей $t_{p.пj} = f(P_j)$.

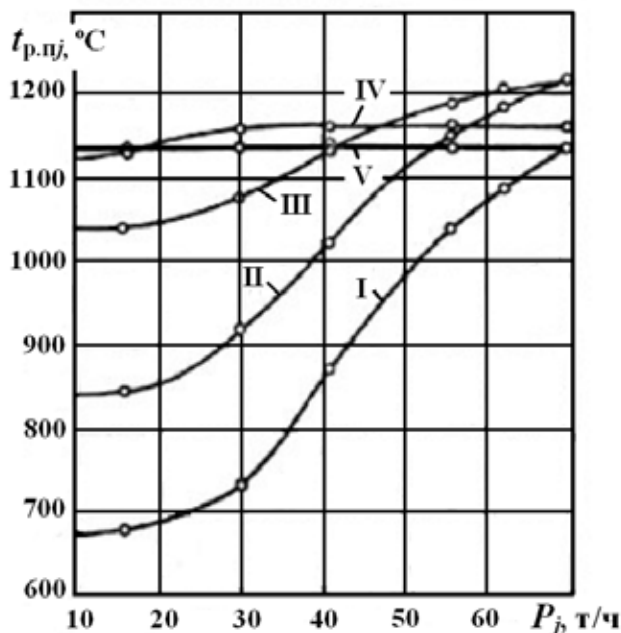


Рис. 18.143. Расчетные зависимости температуры в зонах кольцевой печи (I–V) $t_{p.пj}$ от ее производительности P_j для заготовок из стали ШХ15 диаметром 170 мм

Результаты расчетов показали, что характер и крутизна кривых, представленных в качестве примера на рис. 18.143, не изменяются в зависимости от диаметра d нагреваемого металла, однако с умень-

шением величины d происходит параллельный перенос кривых для первых трех зон в область более низких температур. В связи с этим полином (18.306) можно было представить в следующем виде

$$t_{p.п.j} = a_0 - K_{1j}(d_{\max} - d) + \sum_{k=0, 1, 2, \dots} a_{jk} P_j^k, \quad (18.307)$$

где K_{1j} – корректировочный коэффициент, соответствующий марке нагреваемой стали.

Коэффициенты a_{jk} , входящие в выражение (18.307), были получены для стационарных условий работы печи. Однако в результате различных переходных процессов, вызванных, например, изменением теплоты сгорания топлива, колебаниями расходов топлива и воздуха по зонам и другими факторами, температура металла на выходе из печи может отличаться от расчетной. Для повышения надежности алгоритма управления введена обратная связь, с помощью которой расчетная температура поверхности металла в зоне нагрева t_{mj} сравнивается с фактической температурой поверхности металла $t_{п.мj}$. Температура $t_{п.мj}$ также зависит от производительности, поэтому по зависимости, аналогичной зависимостям на рис. 18.143, находится функциональная связь температуры поверхности металла и производительности печи в каждой зоне нагрева (см. рис. 18.144). Эта зависимость описывается полиномом

$$t_{п.мj} = b_0 - K_{2j}(d_{\max} - d) + \sum_{k=1, 2, \dots} b_{jk} P_j^k, \quad (18.308)$$

где K_{2j} – корректировочный коэффициент, соответствующий марке стали; b_{jk} – коэффициент полинома, определяется при аппроксимации зависимости $t_{п.мi} = f(P_j)$.

Тогда алгоритм управления с использованием обратной связи можно было записать в следующем виде:

$$t_{p.пj} = a_0 - K_{1j}(d_{\max} - d) + \sum_{k=1, 2, \dots} a_{jk} P_j^k + C_j(t_{mj} - t_{п.мj}), \quad (18.309)$$

где C_j – настроечный параметр, определяющий степень введения обратной связи.

Разработанный алгоритм также предусматривает учет взаимного теплового влияния соседних зон нагрева. Для этого, например, можно оценить степень взаимного влияния по разности температур $\Delta t_{p.n}$ между температурами: устанавливаемой по управлению j -й зоны с производительностью P_j и рассчитанной по производительности предыдущей по ходу движения металла в зоне нагрева $j-1$, P_{j-1} по соотношению

$$\Delta t_{p.n} = K_{1j} (d_j - d_{j-1}) + \sum_{i=1}^n a_{j,j-1} (P_j - P_{j-1}), \quad (18.310)$$

где d_j и d_{j-1} – диаметры заготовок в зонах j и $j-1$.

Эта величина $\Delta t_{p.n}$ вводится в виде поправки со знаком «+» или «-» в уравнение (18.307). В первом приближении величина поправки может быть принята $K_z = 1$ и далее уточнена расчетом при учете взаимовлияния на поля температур продольных тепловых потоков между зонами печи [18.1].

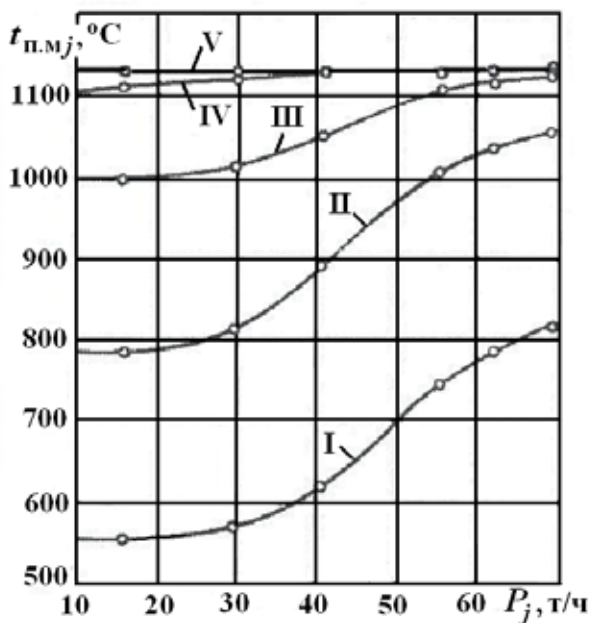


Рис. 18.144. Пример расчетных зависимостей температуры поверхности металла в зонах кольцевой печи (I–V) $t_{п.м,j}$ от ее производительности P_j для заготовок из стали ШХ 15 диаметром 170 мм

Например, в одном варианте, температура радиационных пирометров в зонах I–III печи при изменении производительности была описана уравнениями

$$t_{\text{р.п}}^{(1)} = 975 + 0,4P_1 + 0,0282P_1^2; \quad t_{\text{р.п}}^{(2)} = 1115 - 1,18P_2 + 0,0394P_2^2;$$

$$t_{\text{р.п}}^{(3)} = 1138 - 0,25P_3 + 0,017P_3^2.$$

Расчеты показали, что наиболее существенно при изменении производительности требуется изменять температуры в рабочих зонах печи I и II. Здесь же в наибольшей степени изменяется при этом и температура поверхности металла (см. рис. 18.144).

Для проверки работоспособности рассчитанных алгоритмов нагрева были проведены эксперименты на кольцевой печи стана 160 Первоуральского новотрубного завода для заготовок стали ШХ15 сравнительно большего диаметра 150 и 170 мм (производительность 35 и 62 т/ч соответственно). Печь загружалась заготовками одного геометрического размера, поэтому производительность довольно точно можно было определить по частоте выдачи нагретых заготовок. По графикам типа, показанных на рис. 18.143, устанавливали задания регулятором температур в зонах печи. Температура металла в процессе нагрева замерялась по поверхности и в центре сверленной заготовки штыковой термопарой. Расчетные и экспериментальные температуры металла в зонах отличались не более чем на 10–15 °С. Конечная температура прошивки металла в этих экспериментах составила 1140 °С при допустимых пределах по технологической инструкции 1110–1160 °С.

Таким образом, с использованием многозональной математической модели были определены статические связи между температурами в пяти зонах кольцевой печи для нагрева металла под прошивку. Оценено рациональное распределение тепловых нагрузок по зонам печи для заготовок из стали ШХ15 разного диаметра. Для удобства ввода в управляющую ЭВМ (см. рис. 18.145) расчетные зависимости были представлены в виде полиномов.

Особенностью применения приведенного алгоритма управления является то, что расчет управляющих воздействий проводится заранее для всех возможных режимов нагрева сталей различных марок. В системе управления нет необходимости моделировать ход нагре-

ва: вся информация о нагреве уже сконцентрирована в виде коэффициентов полиномов (a_{jk} и b_{jk}). Коэффициенты полиномов определялись аппроксимацией кривых по методу наименьших квадратов, при этом точность воспроизведения имеющихся зависимостей обеспечивалась полиномом второй степени.

Как видно из формул (18.307) и (18.308), точность вычислений управляющего воздействия $t_{p,li}$ и $t_{п,mi}$ зависит от точности определения производительности P_j . Особенностью работы кольцевой печи является переменная производительность по ее длине. Могут возникать ситуации, когда в печи находятся до десяти партий металла (заказов), отличных по марке стали и геометрическим размерам заготовок. При такой ситуации в каждой отдельно взятой зоне печи будет своя производительность, а следовательно, должна быть и своя температура.

В этом случае производительность в зоне P_j определяется по формуле

$$P_j = \frac{f}{L_j} \sum_{z=1}^m \frac{\pi d_{zj}^2}{4} l_{zj} \rho_{zj} N_{zj} S_{zj}, \quad (18.311)$$

где f – частота выдачи заготовок из печи, шт./ч; L_j – длина зоны j , м; m – число заказов в зоне; d_{zj} – диаметр заготовок в заказе z , м; l_{zj} – усредненная по заказу длина заготовок в зоне j , м; ρ_{zj} – плотность стали нагреваемых заготовок, кг/м³; N_{zj} – число заготовок в заказе, шт.; S_{zj} – межцентровое расстояние между заготовками в заказе z , м.

Система управления тепловым режимом. Как отмечалось, производственные условия требовали повышения производительности кольцевой печи до 70 т/ч. Достижение такой производительности возможно было только при переходе на форсированный режим работы печи. Принимая во внимание частые колебания производительности прокатного оборудования, управление тепловым режимом по расчетным зависимостям рис. 18.145 возможно только при создании АСУ ТП. Методика получения зависимостей температуры зоны от производительности пригодна для всех многозонных нагревательных печей, так как в ее основе лежит зональный метод расчета теплообмена.

На базе алгоритма, разработанного В. Г. Лисиенко и коллегами УрФУ в содружестве с сотрудниками ВНИПИавтоматпром, для ПНТЗ был выполнен и реализован проект АСУ ТП кольцевой печи. На рис. 18.145 представлена структурная схема АСУ нагревом металла

в кольцевой печи. Система управления предусматривает слежение за каждой партией металла (заказом) по всей длине печи, определение позонной производительности нагрева в соответствии с формулой (18.311) и корректировку заданий регуляторам температуры (позонное управление расходом топлива) (см. формулу (18.309)).

Работает система следующим образом. В УВМ поступает информация о перемещении подины, геометрических размерах, марке стали и числе заготовок в каждой загружаемой в печь партии металла. Вся эта информация фиксируется алгоритмом слежения и используется в качестве исходных данных в алгоритме определения позонной производительности и выбора теплового режима. При определении позонной производительности печи по формуле (18.311) используется также текущее значение частоты выдачи заготовок из нее, которое поступает от датчика 4. Для полученных значений производительности P по алгоритму выбора теплового состояния печи (см. формулу (18.309)) с учетом марки стали и диаметра нагреваемых заготовок вычисляются температуры радиационных пирометров $t_{p,п}$, которые преобразуются в электрический сигнал и распределяются на регуляторы температуры 9 каждой зоны печи.

Для предотвращения перегрева металла при резких снижениях скорости вращения подины в условиях форсированного нагрева металла в алгоритме предусмотрена проверка условий:

$$|\Delta t_j| > \Delta t_{\text{доп}},$$

где $\Delta t_j = t_{p,пj} - t_{p,пj-1}$, т. е. берется разница между последним и предшествующим значениями температур для каждой зоны нагрева, вычисленными по уравнению (18.309). Если эта разница превышает допустимое значение Δt_j , что свидетельствует о резком уменьшении производительности печи (см. рис. 18.143), то система (блок сравнения на рис. 18.145) принимает экстренные меры по охлаждению зоны: снижается расход топлива, в зону подается охлаждающий воздух (см. рис. 18.146). Расчетным экспериментальным путем была доказана необходимость таких действий, и с помощью узловой математической модели определена рациональная скорость сброса температуры (см. рис. 18.142).

АСУ нагревом металла в кольцевой печи была пущена в опытно-промышленную эксплуатацию. В связи со сложностью наладки при-

боров, измеряющих температуру поверхности металла (спектральные пирометры), ряд опытных нагревов был проведен без обратной связи, т. е. $C_j = 0$ (см. соотношение (18.309)). Однако заложенные в память УВМ температурные режимы нагрева, функционально связанные с позонной производительностью печи, доказали свою практическую ценность и надежность в работе.

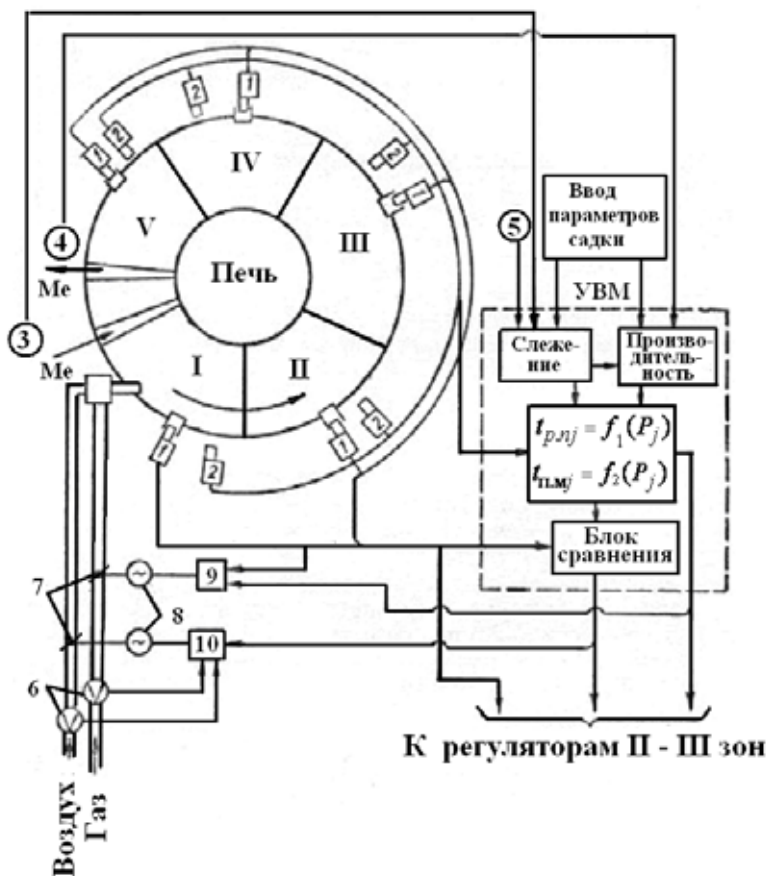


Рис. 18.145. Структурная схема АСУ нагревом металла в кольцевом печи:

- 1, 2 – датчики температуры зоны и поверхности металла;
- 3 – измеритель длины заготовки; 4 – датчик частоты выдачи нагретых заготовок; 5 – датчик угла поворота подины печи;
- 6 – датчики расхода газа и воздуха; 7 – заслонки на трубопроводах газа и воздуха; 8 – исполнительные механизм; 9, 10 – регуляторы температуры и соотношения топливо – воздух

На рис. 18.146 представлены диаграммы изменения во времени производительности (в III теплотехнической зоне печи), управляющего воздействия (значения температуры, которое в виде корректирующего сигнала поступает от УВМ на вход регулятора температуры III зоны печи) и расхода топлива, поданного в печь для достижения заданного АСУ температурного режима нагрева. Условия работы печи нестационарные: в процессе рассматриваемого опытного нагрева произошел переход на заготовки большого диаметра (со 105 на 120 мм) и другой марки стали (с ШХ15 на сталь 20). По технологической инструкции конечная температура нагрева для стали ШХ15 – 1120 °С, а для стали 20 – 1230 °С. В печи между партиями заготовок из стали ШХ15 и углеродистой (сталь 20) делается разрыв около 4–5 м. Из рис. 18.146, *а* видно, что разрыв в III зоне привел к некоторому снижению производительности печи, а при подходе заготовок из стали 20 к окну выдачи ($\tau \approx 1,3$ ч) произошел останов печи, так как прокатное оборудование готовилось к работе с заготовками большего диаметра. Задание регулятору температуры III зоны (см. рис. 18.146, *б*) изменялось в соответствии с изменением производительности в зоне и сменой сортамента нагреваемого металла. Смена задания от УВМ почти на 100 °С для регулятора температуры является существенным возмущением, но, судя по переходному процессу (см. рис. 18.146, *в*, $\tau = 0,75-1$), система быстро справляется с возмущениями.

Еще один показатель качества управления – это изменение удельного расхода топлива во времени. Такая зависимость получена в условиях нагрева заготовок неизменного сортамента, т. е. за время эксперимента не изменялись ни марка стали, ни геометрические размеры. При таких условиях производительность печи зависит только от частоты выдачи нагретых заготовок. На рис. 18.147, *а* и *б*, представлены результаты эксперимента. Нагревались заготовки из стали ШХ15 диаметром 105 мм. Хорошо видно, что на рис. 18.147, *а* (при управлении от АСУ нагревом металла) колебания удельного расхода топлива имеют гораздо меньшую амплитуду, чем на рис. 18.147, *б* (управление с помощью регулятора температуры без корректирующего сигнала от УВМ). Следовательно, наличие корректирующего сигнала позволяет системе раньше отреагировать на возмущение (изменение производительности), изменяя соответствующим обра-

зом управляющее воздействие (задание регулятору температуры). Другим показателем качественного преимущества АСУ нагревом металла является выбор режима нагрева в зависимости от производительности. В обоих случаях средняя производительность печи была неизменна (около 28 т/ч), но усредненный за время эксперимента удельный расход топлива при работе АСУ ТП равен 87 кг/т, а при поддержании температуры в зонах нагрева регуляторами, задание которым не изменялось, удельный расход условного топлива был 108 кг/т стали.

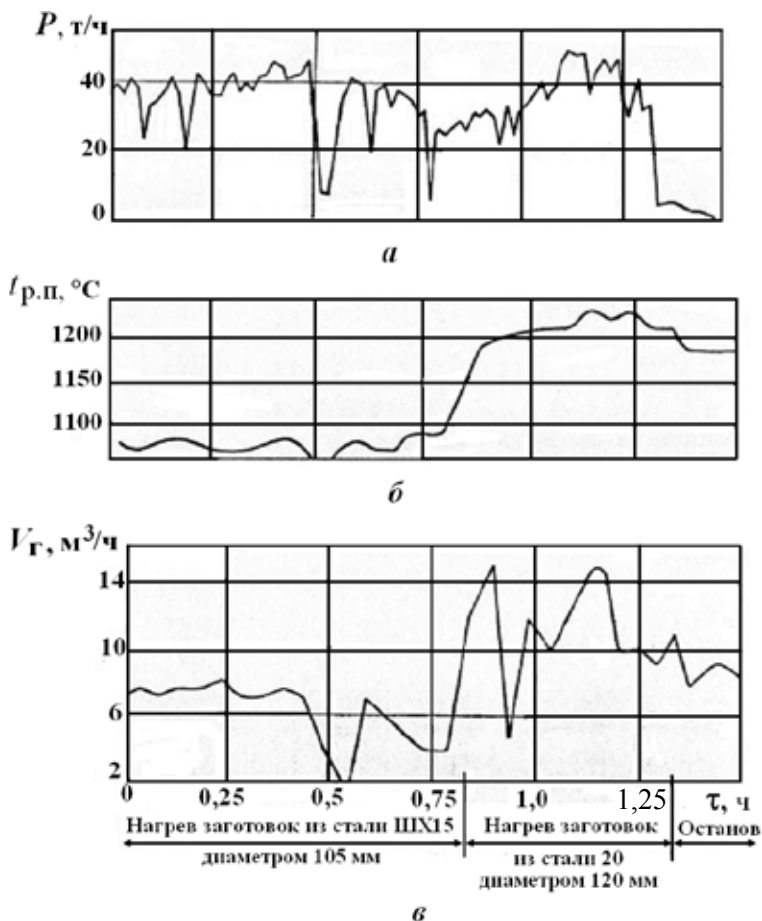


Рис. 18.146. Диаграммы изменения во времени производительности (а), расчетной температуры (б) и расхода топлива (в) для III зоны печи

За время работы АСУ нагревом металла на печи было проведено большое количество опытных нагревов, из которых следует, что с помощью внедряемых как системы управления, так и режимов нагрева удалось значительно снизить удельный расход топлива (на 14–20 %). При этом в условиях низкой производительности печи и малого диаметра заготовок удельный расход топлива удалось снизить и на большую величину (до 20 %).

За время эксплуатации выяснилось, что созданная АСУ нагревом металла была надежна в эксплуатации, повысила экономичность работы печи. По мнению автора, системы такого типа могут быть рекомендованы для всех типов проходных нагревательных печей, которые изменяют свою производительность часто и в широких пределах. Их применение существенно улучшает условия труда сварщиков, повышает культуру производства.

Производительность печи увеличилась на 4 %, угар металла снизился на 3 %.

При исследованиях на модели нагревательной печи с шагающим подом было установлено, что увеличение производительности печи (с выходом на проектную) может быть достигнуто при общем увеличении тепловой мощности печи, в основном за счет второй отапливаемой зоны. Кроме того, требовалось удлинить на 6 м методическую зону, что обеспечивало и улучшение теплового КПД печи.

Таким образом, под руководством В. Г. Лисиенко на примере кольцевой нагревательной печи был разработан алгоритм управления процессом нагрева металла «по текущему темпу» (см. рис. 18.143). В качестве параметра управления выбрана температура поверхности кладки, поскольку при наличии зазоров между заготовками управление по температуре поверхности металла является трудно реализуемым.

В алгоритм введена обратная связь по фактическим температурным параметрам металла (см. формулу (18.309) и рис. 18.144). Принцип обратной динамической связи заключается в выборе управляющих воздействий, исходя из направления развития процесса нагрева и величины фактической среднemasсовой температуры металла.

При разработке алгоритмов управления с компенсацией по возмущению и использованием обратных связей были применены разработанные методы математического моделирования как важнейший элемент имитационно-оптимизирующего комплекса АСУ ТП (см. п. 18.2, рис. 18.1).

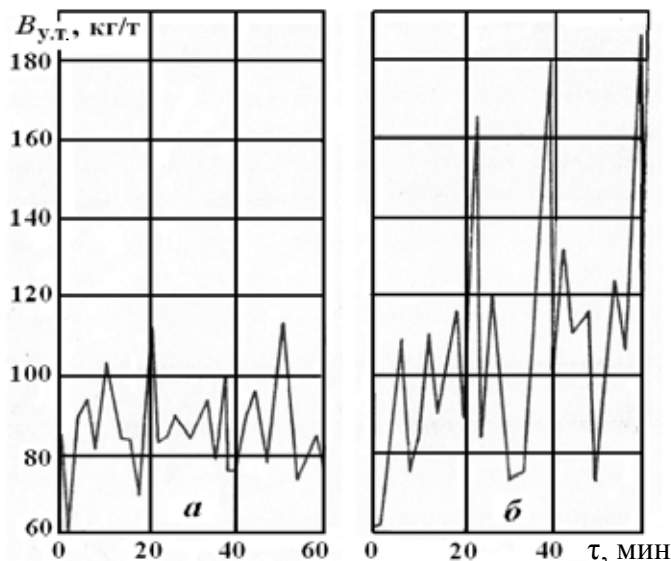


Рис. 18.147. Изменение удельного расхода топлива при ведении режима нагрева с применением АСУ нагревом металла (а) и локальной автоматики для стабилизации режима нагрева (б)

18.8.2. Параметрическая настройка модели оценки теплового состояния проходных нагревательных печей

Дальнейшие разработки были связаны с распространением разработанных алгоритмов управления на другие объекты, в частности, на листопрокатные станы. Эта работа, как отмечалось в развитие работ автора Киевским институтом автоматики (А.Л. Гончаров, Л.Л. Прядкин, И.М. Резник) с участием и консультациями В. Г. Лисиенко.

Для управления тепловым режимом и оценок теплового состояния методических нагревательных печей и печей с шагающими балками использовалась модельная формула для расчета результирующего теплового потока по длине печи L

$$Q_{\text{рез}} = Q_{\text{рез}}(L). \quad (18.313)$$

При этом была применена уже детерминированная теплообменная, хотя и упрощенная нелинейная модель данных печей, как объектов с распределенными параметрами (см. формулу (18.314)).

Для реализации АСУ нагревом в данной постановке в составе программного обеспечения АСУ нагрева металла (например, в печах листопрокатных станов производительностью более 1 млн. т в год) требовалось ввести оценку теплового состояния нагреваемых слэбов. При этом и использовалась модель сопряженного теплообмена (см. формулу (18.314)), которая работала в реальном масштабе времени и осуществляла расчет нагрева каждого слэба циклически с интервалом времени 1–2 мин. К указанной модели предъявляются достаточно высокие требования по точности. Эти требования определяются тем положением, которое занимает задача оценки теплового состояния в структуре АСУ ТП, а именно: она является опорной в подсистеме оптимального управления процессом нагрева металла по мере его продвижения в печи [18.42; 18.45; 18.243; 18.244].

Необходимость функционирования такой модели в реальном времени (модель «on line») приводит к необходимости аппроксимации расчетных соотношений, при этом основное внимание уделялось оценке результирующих потоков излучения по упрощенным формулам. При аппроксимации теплообмена излучением в сложных системах и представлении результирующих тепловых потоков в функции разности четвертых степеней газа (кладки) и поверхности металла для проведения расчетов было невозможно ограничиться лишь одним коэффициентом, учитывающим оптико-геометрические параметры системы, например, видимым коэффициентом излучения. При учете селективности излучения и потерь тепла кладкой даже уже в плоской системе газ-кладка-металл в выражении для видимого коэффициента излучения входят параметры, в свою очередь зависящие от разности температур в четвертой степени [18.1]. Таким образом, в случае сложных излучающих систем в аппроксимирующую формулу для результирующего теплового потока необходимо включать по крайней мере два параметра, отражающих оптико-геометрическую обстановку и реальные поля температур, что и было реализовано на примере формулы (18.314).

В данной задаче оценки теплового состояния при построении ряда АСУ ТП основой сопряжения внутренней и внешней задач теплообмена является процедура пересчета показаний датчика температуры зоны (термопары, установленной в своде печи) в результирующий поток на поверхность заготовки в каждой координате L по

длине печи. При этом с целью обеспечения возможности функционирования модели в темпе с процессом для расчета результирующего теплового потока на металл по длине L рабочего пространства печи $Q_{\text{рез}} = Q_{\text{рез}}(L)$ и использовалась упрощенная формула (18.314).

$$Q_{\text{рез}} = \sigma_{\text{пр}} \left[(K_{\text{пр}} T_{\text{д}})^4 - T_{\text{п.м}}^4 \right] F_j, \quad (18.314)$$

где $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{пр}}(X)$ – приведенный коэффициент излучения, учитывающий теплообмен поверхности металла с рабочим пространством печи; $K_{\text{пр}}(X)$ – коэффициент, связывающий эффективную температуру рабочего пространства печи с показанием датчика температуры $T_{\text{д}}$; $T_{\text{п.м}}$ – температура поверхности металла; F_j – площадь поверхности в зоне j .

В формуле (18.314) все величины изменяются по длине печи L , а также зависят от многих факторов, связанных с работой печи. Основными настроечными параметрами (параметрами идентификации.) являются величины $\sigma_{\text{пр}}$ и $K_{\text{пр}}$. Очевидно, что в условиях действующего агрегата осуществлять поиск этих параметров на основе чисто экспериментальных методов крайне затруднительно. Известно, насколько трудоемки так называемые термпарные эксперименты по нагреву заготовок, при этом не исключена вероятность существенных погрешностей. Для целей параметрической идентификации настроечных параметров можно использовать вычислительный эксперимент, применяя многозональную модель теплообмена и разработанный для этих целей пакет прикладных программ [18.1; 18.243; 18.244]. Так, для j -й зоны металла по длине печи зональное уравнение для расчета $Q_{\text{рез}} = Q_{\text{рез}}(L) = Q_{\text{рез}j}$ сводится к виду (18.314) при определении настроечных параметров по формулам

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{A_j^{\Sigma}}{F_j}; K_{\text{пр}} = \sqrt{\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{m+n-1} A_{ij}^{\Sigma} T_i^4 / (A_j^{\Sigma} T_{\text{п.м}}^4)}, \quad (18.315)$$

где A_{ij}^{Σ} и A_j^{Σ} – селективные коэффициенты радиационного обмена, соответственно, с зоны i на зону j и с зоны j на все остальные зоны, Вт/К⁴; T_i – температура зоны i ; K ; m и n – число объемных и поверхностных зон модели.

В кн. 2, Т. 2 [18.2, рис. 12.97] был приведен пример расчета с помощью математической модели величин $\sigma_{\text{пр}}$ и $K_{\text{пр}}$ по длине рабочего пространства методической печи стана 2000. Расчет этих параметров выполнен для конкретных условий данной печи с учетом ее геометрии, мест установки датчиков температуры зон печи, определенной длины факела и т. д. Изменение этих условий, естественно, скажется на величинах, входящих в формулу (18.315), что может привести и к изменению параметров $\sigma_{\text{пр}}$ и $K_{\text{пр}}$.

Проведенные вычислительные эксперименты выявили сравнительно малое влияние тепловых нагрузок на значения настроечных параметров в зонах. Так, изменения величин $\sigma_{\text{пр}}$ при варьировании тепловых нагрузок были очень малы, величины $K_{\text{пр}}$ также изменялись в диапазоне не более 3 %.

Практика показала, что такой способ идентификации параметров упрощенной модели для расчета результирующего теплового потока на базе вычислительного эксперимента обеспечивает достаточную адекватность модели реального времени, функционирующей в задаче оценки теплового состояния АСУ ТП нагрева металла.

Как отмечалось, указанная система управлением нагрева металла внедрялась Киевским институтом автоматики с участием автора на ряде заводов, идентификация модели выполнялась А.Л. Гончаровым на листопрокатных станах 3000, 2500 и 2000. Реализация АСУ ТП с использованием модельных алгоритмов управления выявили и определенные недостатки, связанные, главным образом, с необходимостью корректировки определенных в процессе моделирования параметров модели в течение времени при значительно изменяющихся условиях нагрева. Приходилось время от времени запускать зональные математические модели как элементы имитационно-оптимизирующего контура АСУ ТП (см. п. 18.2, рис. 18.1).

Выбор места установки датчиков температуры

Процедура выбора места установки датчиков температуры в сварочной зоне методической печи на стадии проектирования АСУ ТП была разработана на базе использования математической модели верхнего уровня (см. [18.2, рис. 12.96]) [18.32; 18.42; 18.45; 18.243; 18.244].

Вопрос о выборе представительного места установки зонной термопары для определения так называемой температуры рабоче-

го пространства печи неоднократно рассматривался в литературе. Основным критерием при выборе места установки датчика температуры зоны служит возможность достаточно представительного отображения через показания термопары плотности суммарного потока излучения, падающего на металл, и температуры металла на выходе из зоны. Ранее место установки зонных термопар определялось на основе эмпирических соотношений, при этом для получения достаточно представительных данных требовалось проведение весьма трудоемких экспериментов на действующих печах. С развитием методов и средств математического моделирования появилась возможность на этапе проектирования АСУ ТП нагрева с использованием вычислительного эксперимента более достоверно оценивать оптимальное место установки термопары. При этом важным критерием представительности места установки термопары является сравнительно малое влияние длины факела на ее показания.

При исследовании и наладке тепловой работы печей листопркатного стана для выбора места установки датчика температуры рабочего пространства, использовались зональные модели нагревательных печей [18.1; 18.243; 18.244]. Температура, измеряемая термопарой, установленной в кладке печи, на модели могла быть определена как локальная температура поверхности кладки в локальной области установки датчика. Были проведены расчеты по оценке степени достоверности такого допущения. Наиболее вероятными источниками погрешности такого допущения являются условия стока тепла с чехла термопары (неточное задание конвективной составляющей теплообмена) и влияние величины высова термопары в рабочее пространство.

Расчетами проверили влияние первых двух факторов. Указанные параметры варьировались в следующих пределах: виртуальный коэффициент теплопроводности по длине чехла изменялся в пределах 0,50–10 Вт/(м²·К), коэффициент теплоотдачи конвекцией – в пределах 5–50 Вт/(м²·К). При таких заметных вариациях этих параметров, охватывающих весь возможный диапазон их изменений в реальных условиях печи, максимальное отклонение температуры поверхности кладки в исследуемой локальной области не превысило 8 °С. Было основание полагать, что главным источником отличия результатов моделирования рабочего пространства от реальных измерений

в печи может являться глубина погружения термопары в рабочее пространство. Действительно, практика показывает, что эти погрешности могут достигать 40–50 °С, причем знак этой погрешности существенным образом зависит от конкретной конструкции печи. Из проведенных наблюдений за работой зонных термопар следует, что наиболее устойчивые воспроизведения результатов измерения дают термопары, выдвинутые в рабочее пространство печи на 30–50 мм, при этом показания термопары наиболее близки к температуре поверхности кладки.

Выбор мест установки датчиков температуры рабочего пространства был проведен на базе серии вычислительных экспериментов с использованием многозональной математической модели, в которых варьировался ряд параметров, определяющих процесс нагрева слябов. Пределы варьирования параметров моделей печей при определении мест установки датчиков температуры рабочего пространства следующие:

Параметр	Пределы варьирования параметров для печей станов		
	2000	2500	3000
Толщина нагреваемых слябов, м	250	300	210–315
Производительность печи, т/ч	20–10	240–420	80–160
Тепловая нагрузка на теплотехническую зону – расход природного газа, м³/ч	150–30	3000–5500	550–1050
Длина теплотехнической зоны l , м	8	10	14
Относительный диапазон измерения длин факелов l_{ϕ}/L_3	0,25–0,75	0,3–0,7	0,2–0,6
Координата зонной термопары l/L_3	0,6	0,55	0,535
Примечание: l_{ϕ} – длина факела; L_3 – длина сварочной зоны печи.			

Принятый значительный диапазон варьирования длиной факела при моделировании обусловлен отсутствием достаточно надежных данных о наиболее приемлемой длине факела. Это обстоятельство особенно характерно для вновь проектируемых печей. Закон выго-

рания топлива (природный газ) по длине факела был принят в соответствии с соотношениями, приведенными в работах [18.1; 18.15; 18.16; 18.20].

Результаты проведенных вычислительных экспериментов для сварочной зоны печи стана 3000 были приведены в [18.2, рис. 12.96]. Из анализа температурных полей по длине свода следует, что на своде печи существует локальная область D , температура которой очень слабо зависит от длины факела, а, также температуры металла, входящего в теплотехническую зону, и его толщины. Однако температура этой области значительно зависит от тепловой нагрузки зоны, что как раз делает эту локальную область представительной с точки зрения регулирования и контроля температуры зоны нагрева. Независимость этой локальной области свода от длины факела и параметров нагрева металла дает возможность определить достаточно устойчивую взаимосвязь температуры зоны и потоком поглощенного поверхностью металла излучения $Q_{\text{погл.м}}$.

Таким образом, для обеспечения приемлемой идентификации падающего теплового потока по длине теплотехнической зоны, согласно этим данным, датчик температуры рабочего пространства необходимо было устанавливать в ту область на своде печи, в которой температура внутренней поверхности оказывается инвариантной к изменению всех параметров, кроме тепловой нагрузки. Для печей станов 3000, 2500 и 2000, эта область расположена на расстоянии $(0,5-0,6)L_z$ от начала рабочей зоны, что для печей станов 2000, 2500 и 3000 составляет соответственно 4,8, 5,5 и 7,5 м.

Поскольку в этих случаях распределение степени выгорания топлива по длине факела принимается одинаковым, есть основание полагать, что место установки датчика температуры зоны зависит от специфики конкретных геометрических параметров рабочего пространства зоны печи, но в относительных величинах координата точки установки изменяется сравнительно мало.

Интересен опыт использования АСУ нагрева металла на нагревательной печи с шагающим подом стана 5000 Мариупольского завода им. Ильича (в разработке Киевского института автоматики при консультациях В. Г. Лисиенко). При этом для управления нагревом также использовалась математическая модель представленная формулой (18.314). На основании этой модели разрабатывалась траектория нагрева по зонам печи в зависимости от производительности,

сортамента металла и т. д. по аналогии с рис. 18.143 и с формулами (18.307)–(18.309). Эти траектории нагрева вводились в управляющую ЭВМ и использовались в реальном времени нагрева. Зональная математическая модель печи (18.1; 18.2; 18.244; 18.293; 18.295), была включена в программное обеспечение уже второй вычислительной ЭВМ и с ее помощью формировались траектории нагрева для первой управляющей ЭВМ. В случае выявления недостатков в управлении нагревом при изменении каких-либо технологических параметров проката (недогрев или перегрев металла) с использованием математической модели проводилась требуемая корректировка траектории нагрева и эти скорректированные траектории вводились в управляющую ЭВМ. Автору в сопровождении А.Л. Гончарова удалось лично наблюдать ход управления нагревом, проводимый в автоматическом режиме «робота», практически без активного участия оператора-нагревальника.

Приведенные примеры иллюстрируют возможности использования математических моделей и основанного на них программного обеспечения, разработанных для проектирования АСУ ТП нагрева металла. Настройка коэффициентов модели внешнего теплообмена были осуществлены Киевским институтом автоматики при эксплуатации АСУ ТП нагрева металла стана 3000. Выбор мест установки датчиков температуры зон печи и датчиков пирометрической системы пирометр – термопара реализован на этапе проектирования печей станов 2000 и 2500. Модели печей, разработанные на основе данного проекта, были использованы для поиска оптимальных траекторий нагрева металла. Включение в разработанный пакет подпрограмм для решения уравнений нестационарной теплопроводности позволил создать динамические модели теплообмена для осуществления разработки алгоритмов управления и их настройки на конкретный объект управления.

18.8.3. Динамическая оптимизация процесса нагрева движущегося металла

Можно констатировать, что в области создания автоматизированных систем управления нагревом металла уже достигнуты определенные успехи. При этом экономия топлива при использовании АСУ ТП составляет 15 %.

Важным этапом в развитии АСУ нагревом металла была система с учетом динамики нагрева, связанные, как выше отмечалось, с так называемым «темпом проката» (смена размеров заготовок и их сортамента, изменение производительности стана, останова и пуски и т. д.).

Однако применяемые математические модели, методы и алгоритмы управления еще далеки от совершенства. Так, например, геометрические упрощения при моделировании процессов нагрева, сведение модели сложного (сопряженного) теплообмена к задаче одномерной теплопроводности с настраиваемыми граничными условиями существенно снижают точность расчетов текущего состояния и тем самым эффективность алгоритмов оптимизации. Опыт эксплуатации современных АСУ ТП показал необходимость более детальной проработки температурных режимов нагрева, подлежащих реализации, с целью проверки гарантий выполнимости технологических и температурных ограничений в условиях динамических возмущений по скорости продвижения металла в печи. Существенная нестационарность состояния процесса, вследствие характерной для большинства технологий нагрева неритмичной работы прокатного оборудования, вызывает повышенный разброс теплосодержания заготовок на выдаче. Эффективность существующих систем управления проявляется поэтому при сравнительно большом времени нагрева массивного металла и отсутствии резких возмущающих воздействий по темпу продвижения заготовок в печи. Большую перспективу имеют исследования, посвященные разработке экономичных тепловых режимов нагрева движущегося металла в пламенных противоточных печах с боковым и сводовым отоплением с учетом динамики процесса, возникающей при переменном темпе прокатки. Основной упор при этом делается на создание комплексной системы имитационного моделирования, с помощью которой можно было бы вести оптимизацию режимов нагрева металла с учетом температурных и технологических ограничений, а также динамических отклонений от регламентных скоростей процесса, выполнять апробирование алгоритмов управления в реальном времени [18.1; 18.2; 18.25; 18.45; 18.245; 18.246].

Методика динамической оптимизации тепловых режимов нагревательных печей с движущимся металлом

Предыдущие примеры демонстрировали применение математической модели верхнего уровня в квазистатическом режиме, при этом в уравнении [18.1, (7.34)] величина $\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{\Delta T_j}{\Delta t} = 0$ (см. уравнение [18.1, (7.49)]).

Как отмечалось, разработанные методики позволяют исследовать и динамику процессов. Разработана замкнутая имитационная модель нестационарного процесса нагрева металла в составе: балансово-теплообменной модели печи, моделей датчиков температуры и локальной автоматики участка печи, а также сменного блока оптимизации процесса [18.1; 18.25; 18.245; 18.246].

Под руководством В. Г. Лисиенко в разработке методики активное участие принимали В.В. Волков, Ю.К. Маликов и А.А. Константинов*.

Для расчета внешнего теплообмена был применен зонально-динамический метод на основе резольвентного подхода с использованием быстродействующих программ расчета оптико-геометрических характеристик, что позволяет выделить в модели ключевые геометрические подробности [18.1; 18.25; 18.45; 18.293]. Так при нагреве металла с характерной двумерной конфигурацией учитывается локальное лучистое взаимодействие с транспортирующими элементами (подина, балки, ролики и т. д.). Решение двумерной нелинейной задачи теплопроводности проводится по неявной конечно-разностной схеме. При этом условиями сопряжения внешней задачи радиационно-конвективного теплообмена и внутренней задачи кондуктивного теплообмена являются:

1. Равенство нулю суммы всех потоков тепла на границе «твердое тело - газ».

2. Равенство средней температуры на границе тела и температуры поверхностной зоны, расположенной на этой границе.

Перенос тепла в металле и кладке происходит за счет теплопроводности и движения металла вдоль печи. Уравнение сохранения энергии при этом дополняется соответствующими начальными и

* Константинов А.А. Разработка экономичных тепловых режимов нагревательных печей с движущимся металлом при использовании динамической модели управляемого процесса нагрева / А.А. Константинов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. - Свердловск, 1988. - 24 с.

граничными условиями. Такая формулировка сопряженной задачи радиационно-конвективного и кондуктивного (внутри тел) теплообмена является достаточно общей не только для промышленных печей проходного типа, но и для широкого круга высокотемпературных технических установок.

На основе сопряженной задачи теплообмена разработана также и математическая модель датчика температуры во «встроенном варианте», позволяющая рассчитывать нестационарные температурные поля в карборундовом чехле радиационного пирометра (или защитном чехле термоэлектрического термометра) и прилегающем участке кладки печи. После проведения этапа вычислительной идентификации в имитационный комплекс (рис. 18.148) введено упрощенное, описание динамических характеристик датчика в виде линейного дифференциального уравнения 1-го порядка.

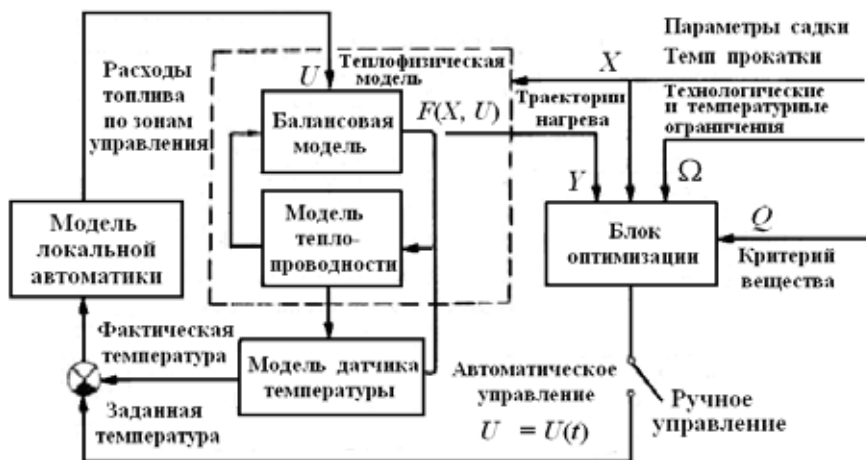


Рис. 18.148. Блок-схема программного обеспечения имитационного комплекса

Модель локальной автоматики построена для широко распространенного ПИ-регулятора. Расходы топлива рассчитываются в модели локальной информатики по сигналу рассогласования заданных и фактических значений температуры согласно выбранному закону регулирования. В случае нарушения ограничений соответствующим

шим образом корректируется температура задания. Коррекция может проводиться вручную или автоматически в блоке оптимизации.

Этап оптимизации (см. рис. 18.148) связан с принятием решения о том, каково должно быть управление U , чтобы достигнуть заданных экстремальных величин Q и неэкстремальных значений Ω целей в условиях текущей информации о состоянии процесса Y , отображаемого в модели $F(X, U)$, и выделенных ресурсах управления (временных, энергетических, материальных и др.). Реализовать целевые условия Ω и Q можно было только с помощью соответствующего изменения состояния процесса Y . Это означает, что выполнение целей возможно только при соответствующем выборе управления U и с использованием функции (модели) $F(X, U)$, описывающей состояние процесса Y , в режиме прогноза на ближайшее будущее. При этом следует иметь в виду, что неуправляемые входы X (см. рис. 18.148) изменяются под воздействием внешних факторов производства.

Эти очевидные соображения приводят к формулировке экстремальной задачи в классе задач нелинейного программирования

$$\begin{aligned} Q(X, F(X, U)) &\rightarrow \min_{U \in \Omega}, \\ Q: \begin{cases} G(X, F(X, U)) = 0; \\ H(X, F(X, U)) \geq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (18.316)$$

где $G(\dots)$ – основные требования технологии; $H(\dots)$ – требования к качеству и другие ограничения на процесс.

Таким образом, для оптимизации процесса нагрева металла в печах прокатного производства была сформулирована задача линейного программирования. В качестве критерия оптимальности рассматривалась минимизация основных затрат на нагрев металла.

Эта задача решена с использованием пошагового метода задачи линейного программирования ввиду нелинейности коэффициентов как целевой функции, так и уравнений, составляющих систему ограничений Ω (18.136). В качестве критерия оптимальности рассматривалась минимизация основных затрат на нагрев металла. Минимизируемая целевая функция имеет вид

$$Q = C_T \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial T_i} \Delta T_i + C_M \sum_{i=1}^n \frac{\partial W}{\partial T_i} \Delta T_i, \quad (18.317)$$

где V – расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$; W – расход металла на окалину, $\text{м}^3/\text{ч}$; ΔT – приращение управляющих воздействий по температуре в зонах регулирования, К ; C_T и C_M – соответственно цена топлива и металла; n – число зон регулирования.

Ограничения связаны с требованиями по технологии и качеству металла

$$T_M^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial T_M}{\partial T_i} \Delta T_i = T_M^{\text{зад}}, \quad (18.318)$$

$$\Delta T_M^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial (\Delta T_M)}{\partial T_i} \Delta T_i < \Delta T_M^{\text{зад}}, \quad (18.319)$$

где T_M , ΔT_M – среднемассовая температура и перепад температур по сечению металла на выдаче из печи, К ;

а также по максимально допустимой температуре кладки

$$T_i^0 + \Delta T_i \leq T_{i,\max}, i = \overline{1, n};$$

и диапазону изменения расхода топлива в зонах регулирования

$$V_{i,\min} \leq V_i^0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V_i}{\partial T_i} \Delta T_i \leq V_{\max}, i = \overline{1, n}; \quad (18.320)$$

где V_i – расходы топлива по зонах регулирования, $\text{м}^3/\text{ч}$; T_M^0 , ΔT_M^0 , V_i^0 – параметры текущего состояния процесса нагрева металла.

Коэффициенты целевой функции и ограничений рассчитываются на каждом шаге по времени с помощью замкнутой имитационной модели (см. рис. 18.148) путем последовательного задания пробных отклонений управляющих воздействий по температуре ΔT_i^0 . При определении количества образовавшейся на поверхности металла окалины использована модель высокотемпературного окисления, разработанная в Киевском НПО «Промавтоматика». Решение задачи линейного программирования проводилось симплекс-методом.



Рис. 18.149. Структурная схема имитационного комплекса для оптимизации тепловых режимов печей при заданной производительности:

а – замкнутая имитационная модель процесса нагрева металла;

б – блок оптимизации

В результате решения задачи нелинейного программирования (18.316) показано, что для пламенных противоточных печей с боковым и сводовым отоплением оптимальным по потреблению топлива и расходу металла в окалину является достаточно известный режим нагрева с максимальным смещением тепловой нагрузки в сторону окна выдачи. Если перепад температуры по сечению заготовок в конце нагрева не удовлетворяет требованиям качества, то возникает необходимость их выдержки в печи при постоянной среднемассовой температуре. Таким образом, оптимальным следует считать режим нагрева с одним переключением – от максимально допустимой температуры кладки в зоне интенсивного нагрева до заданного значения температуры в зоне выдержки.

Для экспрессного расчета оптимальных тепловых режимов в реальном времени при изменяющейся производительности предложен метод, построенный на взаимодействии сравнительно простой модели регулярного режима нагрева массивной пластины в проти-

вотоке и подробной замкнутой модели. Упрощенная модель описывает класс оптимальных стационарных режимов и обеспечивает необходимое быстродействие в качестве алгоритма предварительного распределения топлива по длине печи. Роль подобной модели заключается в проверке реализуемости выбранного теплового режима с точки зрения удовлетворения температурным и технологическим ограничениям, а также в уточнении параметров оптимального режима нагрева. Структура контура оптимизации приведена на рис. 18.149. По сравнению с алгоритмом, основанным на методах линейного программирования, затраты машинного времени при таком алгоритме сокращаются в три раза. Пример оптимизации приведен на рис. 18.150.

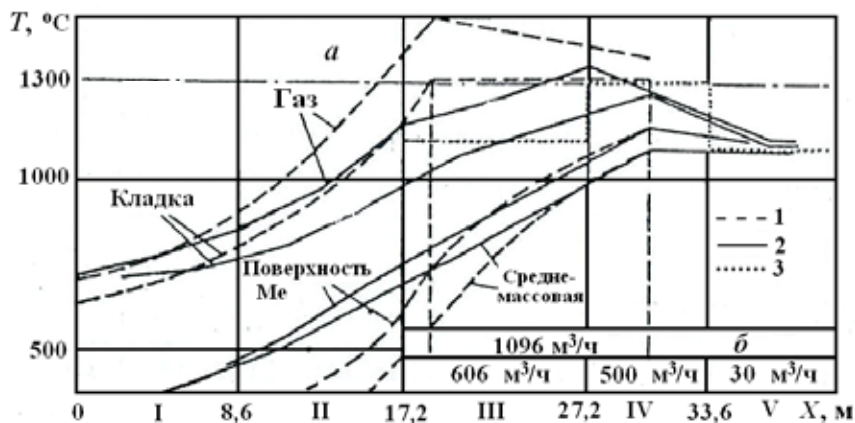


Рис. 18.150. Оптимальный режим нагрева заготовок из стали ШХ15 диаметром 115 мм, длиной 1600 мм (посад двурядный):

- a* – кривые нагрева в кольцевой печи ПНТЗ при производительности 32 т/ч,
б – пример распределения по зонам печи расходов топлива для подробной модели; 1 – расчет на простейшей модели; 2 – то же на подробной;
 3 – уставки температуры кладки по зонам

Таким образом, был разработан алгоритм и комплекс программ, позволяющий рассчитать динамические режимы нагревательных печей с движущимся металлом и включающий зональную балансово-теплообменную модель локальной автоматики и блок определения управляющих воздействий.

Методы оптимизации тепловых режимов противоточных печей использованы под руководством и при участии авторов при совершенствовании тепловой работы кольцевых нагревательных печей Первоуральского новотрубного завода (ПНТЗ), проектировании технологии нагрева бандажных заготовок в кольцевой печи Нижне-Тагильского металлургического комбината, при проектировании и пуске АСУ нагревом металла использовались на Ново-Липецком металлургическом комбинате, Мариупольском заводе им. Ильича, металлургическом заводе «Амурсталь», на ряде зарубежных заводов.

Анализ работы печи при возмущениях по скорости движения заготовок (производительности печи) и разработка динамических алгоритмов управления процессом нагрева

Как отмечалось, нагревательные печи сортовых станов работают в условиях постоянных возмущений по скорости движения заготовок, вызванных неритмичной работой прокатного оборудования. При низкой точности прогноза времени пребывания заготовок в печи управление нагревом металла может осуществляться «по текущему темпу». Колебания производительности печи должны сопровождаться переходом с одной оптимальной траектории нагрева на другую, что связано с изменением режима зоны интенсивного нагрева. Перестройка режима отапливаемых зон происходит не мгновенно. Поэтому между зоной выдержки и интенсивного нагрева необходимо было создавать переходный участок, представляющий как бы накопитель нагретого металла и обеспечивающий заданное качество тепловой обработки заготовок во время перестройки режима зоны интенсивного нагрева. При переходе с низкой на более высокую производительность металл не успевает прогреться до требуемой температуры, а при обратном переходе может иметь место перегрев металла.

Для расчета размеров переходного участка была разработана методика с использованием замкнутой имитационной модели процесса нагрева металла, основанная на анализе тепловых переходных процессов, возникающих при компенсации единичных возмущений бесконечной продолжительности [18.1; 18.25; 18.45].

В монографии [18.2, рис. 12.116] был показан переходной процесс по результатам вычислительного эксперимента на математической модели нагревательной кольцевой печи для системы с компенса-

ей по возмущению. При этом в соответствии с моделями реального времени скачок производительности P скомпенсирован расчетным (оптимальным) скачкообразным изменением уставки регулятора температуры во второй зоне $T_{K_2}^*$ и соответствующего расхода газа G_{Σ}^r . Графики демонстрируют характер переходных процессов, которые оказываются в данном случае достаточно сложными (колебательными) и весьма длительными $t_{\text{пер}} \approx 80$ мин. Однако возможные ошибки управления в виде динамических отклонений среднемассовой температуры металла $T_{\text{ср.м}}$ и перепада температур по сечению ΔT не выходят за пределы допустимых значений. Данный эксперимент является подтверждением не только статической, но и динамической приемлемости выбранных компенсационных воздействий. График наглядно демонстрировал, что в столь инерционных процессах, как процессы нагрева, применение обычных систем регулирования по отклонению недопустимо, так как может привести к непоправимым технологическим последствиям (перегрев металла, недопустимая неравномерность температур и т. д.).

Анализ результатов моделирования показал, что в случае заданных размеров печи увеличение длины отапливаемой части печи за счет переходного участка обуславливает сравнительно небольшой перерасход топлива (в размере 3–5 %) по сравнению с квазистационарным режимом нагрева при номинальной производительности нагрева. Например, в условиях нагревательной кольцевой печи, длина переходного участка составляла 5 м (для номинальной производительности).

В дополнении к имитационному комплексу процесса нагрева (см. рис. 18.149) усовершенствован алгоритм управления процессом нагрева металла «по текущему темпу» (см. рис. 18.151). В качестве параметра управления выбрана температура поверхности кладки, поскольку при наличии зазоров между заготовками управление по температуре поверхности металла являлось трудно реализуемым.

Алгоритм заключался в предварительном расчете зависимости заданных температур в зонах от производительности. Расчет режимов нагрева металла выполняется по методике, описанной выше (см. рис. 18.149), путем увеличения в соответствии с размерами переходного участка длины зоны выдержки.

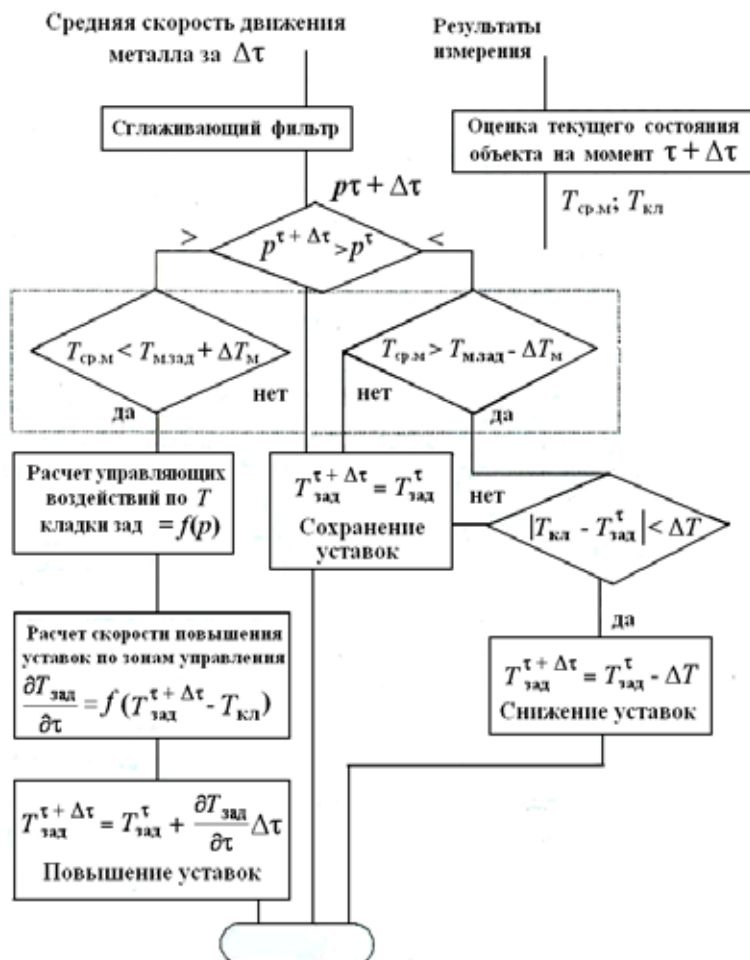


Рис. 18.151. Структурная схема алгоритма управления нагревом металла

В алгоритм введена обратная связь по фактическим температурным параметрам металла. Принцип динамической обратной связи заключается в выборе управляющих воздействий, исходя из направления развития процесса нагрева и величины фактической среднемассовой температуры металла. При перегреве и увеличении скорости движения заготовок задерживается соответствующее увеличение управляющих воздействий по температуре

кладки. В условиях недогрева сдерживается снижение управляющих воздействий возмущений. Поскольку для возмущений, амплитуда которых меньше максимальной, размеры переходного участка велики, в алгоритме предусмотрено регулирование скорости повышения управляющих воздействий.

Апробирование алгоритма управления было выполнено на примерах расчета нагрева заготовок в кольцевой печи при характерных для действующей печи возмущениях по производительности.

Анализ результатов моделирования показал, что по сравнению с существующими режимами «гарантированного» нагрева при «ручном» управлении разработанный алгоритм позволяет снизить разброс теплосодержания заготовок на выдаче из печи на 38 %, уменьшить удельный расход топлива на 35 % при сохранении неизменных показателей процесса окалинообразования (толщина слоя окалины порядка 0,5–0,7 мм).

Результаты (см. рис. 18.152) одного из примеров нагрева получены при использовании безынерционного датчика температуры кладки.

Для исследования влияния инерционности датчика на результат нагрева рассмотрен вариант управления нагревом металла по показаниям радиационного пирометра, свизированного на дно карборундового стакана (постоянная времени принята равной 70 с). Запоздывание измерений приводит к увеличению перерегулирования по температуре кладки, что ухудшает качество стабилизации среднемассовой температуры заготовок на выдаче – максимальное отклонение среднемассовой температуры от заданного значения оказалось на 20 % больше, чем для безынерционного датчика. Экономические показатели тепловой работы печи практически не изменились.

Предложенный алгоритм динамического управления и был положен в основу программного обеспечения системы управления кольцевой печи.

Таким образом, в результате решения задачи линейного программирования показано, что для противоточных печей в квазистационарных условиях оптимальным по потреблению топлива и расходу металла в окалину является тепловой режим с одним переключением – от максимально допустимой температуры кладки в зоне интенсивного нагрева до заданного значения температуры в зоне выдержки. Разработан быстродействующий метод расчета оптимальных тепловых режимов противоточных печей, который был использован при совер-

шенствовании тепловой работы кольцевых печей ПНТЗ и НТМК.

Сформулированы основные принципы управления процессом нагрева металла в условиях возмущений по производительности. Показано, что между зонами выдержки и интенсивного нагрева необходимо создавать переходный участок, играющий роль накопителя нагрева металла и обеспечивающий заданное качество топленой обработки заготовок в период перестройки теплового режима печи при отработке возмущений по производительности. Предложена методика расчета размеров переходного участка в условиях заданной длины печи. Так, для кольцевой печи ПНТЗ длина переходного участка составляет 5 м (при номинальной производительности).

Предложен алгоритм динамического управления нагревом заготовок «по темпу проката» с обратной связью по фактическим температурным параметрам металла. Использование алгоритма позволило применительно к нагревательной кольцевой печи снизить удельный расход топлива на 35 % и уменьшить разброс теплосодержания заготовок на выдаче из печи на 36 %. Показано, что увеличение инерционности датчика температуры кладки (от безынерционного до постоянной времени 70 с) приводит к увеличению разброса среднemasовой температуры заготовок на выдаче из печи на 20 %.

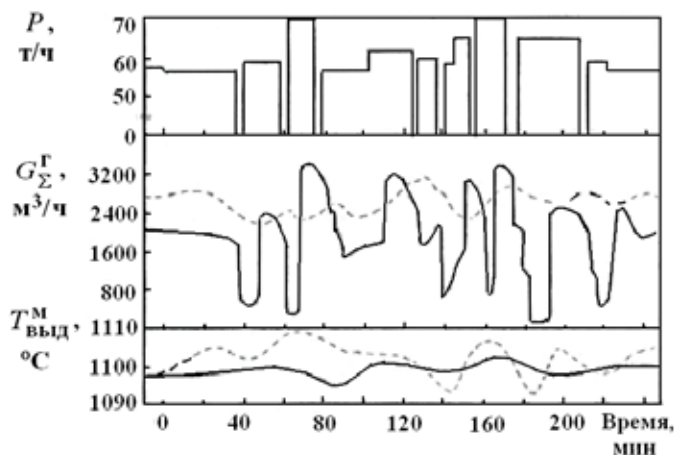


Рис. 18.152. Управление нагревом заготовок в кольцевой печи ПНТЗ:

Пунктир — существующий режим «ручного» управления;

P — производительность печи по металлу; G_{Σ}^{Γ} — суммарный расход природного газа; $T_{\text{выд}}^{\text{М}}$ — температура металла на выходе

На Оскольском электрометаллургическом комбинате под руководством В. Г. Лисиенко были проведены расчеты по оптимизации процессов нагрева слэбов на методической печи (при производительности 200 т/ч и 300 т/ч и даны соответствующие рекомендации (см. [18.2, рис. 12.95]).

Структурные схемы имитационно-оптимизирующего комплекса и решения задачи оптимизации также были представлены в [18.2, рис. 12.93, 12.94]. Как отмечалось с участием В.В. Волкова и В.В. Еголаева были разработаны динамические 3-х мерные модели процессов нагрева в печах с шагающими балками и термообработки (отжига) металла в печи стана 700 сортопрокатного цеха № 1 Оскольского электрометаллургического комбината. Модели были оснащены развитым интерфейсом пользователя и представляли собой программный продукт для разработки технологических инструкций по нагреву и термообработке (отжигу), а также для анализа переходных тепловых процессов в динамических производственных ситуациях.

Кроме того, модель печи нагрева с шагающими балками была снабжена процедурой расчета оптимальных температурных уставок в зонах управления по критерию минимума расхода топлива для фиксированных данных о нагреваемом сорimente и такте выдачи заготовок печи.

Обобщая материалы по управлению нагревом движущегося металла с учетом «темпа», представили структуру ТАСУ нагревом на рис. 18.153.

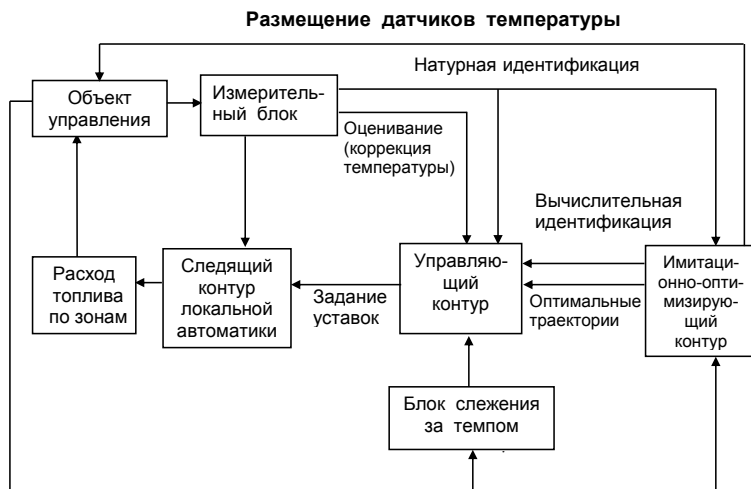


Рис. 18.153. Функциональная структура ТАСУ ТП нагревом материала (металла)

Учет темпа проката при этом реализуется в специальном блоке слежения. Управляющий контур дополняется устройствами, обеспечивающими возможность установления обратной связи с объектом и натурной идентификации, а также системой оценивания и коррекции определяемых измерительным блоком температур. Например, при использовании метода двух датчиков температуры вводится поправка на отраженное излучение, может вводиться поправка на степень черноты поверхности и наличие окалины, осуществляется переход от температуры поверхности к температуре средней по массе и т. д.

Таким образом, учет динамики в нагревательных и термических печах является важным фактором при создании АСУ нагревом металла.

18.8.4. Развитие структуры трехуровневой АСУ нагревом металла

Проведем определенное обобщение по структуре и функционированию трехуровневой АСУ ТП (см. п. 18.8.3) применительно к АСУ нагревом металла (см. рис. 18.149, 18.151, 18.153).

На первом уровне - в первом следящем контуре – используются обычные регуляторы температуры, поддерживающие температуру в рабочих зонах печи на заданном уровне путем изменения подачи энергии на нагрев (природный газ, электроэнергия и т. д.). На втором уровне (в управляющем контуре) реализуется оптимальное управление нагревом в реальном времени на основе использования оптимальных траекторий нагрева по зонам печи и выбора их в зависимости от темпа нагрева (производительности). Темп нагрева определяется в специальном блоке слежения. Управляющий контур дополняется устройствами, обеспечивающими возможность проведения обратной связи с объектом и натурной идентификации, а также системой оценивания и коррекции определяемых измерительным блоком температур. Например, при использовании метода двух датчиков температуры вводится поправка на отраженное излучение, может вводиться поправка на степень черноты поверхности и наличие окалины, осуществляется переход от температуры поверхности к температуре, средней по массе и т. д. [18.1; 18.2; 18.25; 18.42; 18.45].

Для этого класса систем можно было определить следующие основные функции третьего - прогнозирующего и поддерживающего уровня (имитационно-оптимизирующего контура), предложенные в п. 18.8.1.

Как отмечалось, например, управляющий контур может обеспечивать непосредственное задание оптимальных установок регулятором температуры в рабочих зонах j $T_{Kj}^{3д}$ нагревательного устройства в соответствии с [18.16; 18.25; 18.45], см. также уравнения (18.301, 18.309).

$$T_{Kj}^{3д} = T_{Kj}^*(P_j) - K_j [T_{Mj}^*(P_j) - T_{Mj}], \quad (18.322)$$

где P_j – текущий темп нагрева; T_{Mj} – фактическая температура металла; K_j – коэффициент обратной связи; $T_{Kj}^*(P_j)$ и $T_{Mj}^*(P_j)$ – заданные (оптимальные) значения температур кладки и металла в зоне j .

Структура функций $T_{Kj}^*(P_j)$ и $T_{Mj}^*(P_j)$ может быть задана в полиномиальном или ином виде и, во всяком случае, должна быть приемлемой для реализации управления в реальном времени (см. п. 18.8.1).

В других случаях [18.45; 18.243; 18.244] основу оценки теплового состояния составляет процедура пересчета показаний датчика температуры зоны (термопары, пирометра) T_d в результирующий поток на поверхность металла в рабочих зонах по длине печи. При этом с целью обеспечения возможности функционирования модели в темпе с процессом для расчета результирующего потока на металл $Q_{рез}$ по длине печи X $Q_{рез} = Q_{рез}(X)$ используется упрощенная формула (18.314).

Для случая теплообмена в слое сыпучих материалов, в частности, в процессах обжига окатышей модель управления реального времени используется, например, в аппроксимированной статической двумерной постановке [18.15; 18.32; 18.45; 18.69; 18.70; 18.72] в виде, например, дифференциальных уравнений (см. формулы (18.66)–(18.70)).

В представленных уравнениях, определяющих оптимальные траектории нагрева, присутствует целый ряд величин ($T_{Kj}^*(P_j)$, $T_{Mj}^*(P_j)$, $\sigma_{пр}$, $K_{пр}$, T_{mj} , $T_{п.м}$, α_v , ε и др.), изменяющихся как по длине печей, так и зависящих от многих факторов, связанных с работой печи. Очевидна трудность натурной идентификации этих параметров. Известно, например, насколько трудоемки так называемые термопарные эксперименты по нагреву заготовок, при этом не исключена и вероятность существенных погрешностей.

Эта проблема на современном уровне может быть решена на основе вычислительной идентификации при использовании поддерживающей имитационной модели.

Работы по оптимизации технологических режимов нагрева применительно к номинальным (стационарным) условиям являются необходимым и очень важным этапом исследовательских работ, предваряющих разработку и проектирование автоматизированных систем управления (АСУ ТП) участками печей прокатных станков. В процессе этого этапа вырабатывается для конкретного объекта теплотехнически обоснованная стратегия управления и определяются базовые траектории нагрева в полном диапазоне изменения характеристик нагреваемого металла и производительности печи. При этом, дифференцированный подход при выборе температурных условий в зонах управления в зависимости от сортамента заготовок и способа их укладки, обеспечиваемой компьютерным управлением, позволяет по сравнению с ручным управлением снизить расходы топлива на 10–15 %. Ниже в дополнении к предыдущему материалу рассмотрены основные функции и структура типовой системы управления процессами нагрева в проходной нагревательной печи, позволяющей обеспечить указанный эффект.

Развитие автоматизированного нагрева металла и экономия топлива. Приведенные примеры оптимизации тепловых режимов нагревательных печей на основе детального рассмотрения теплотехники и технологии процесса нагрева металла показали, что в реальных условиях могут быть улучшены основные статьи тепловых балансов, определяющие тепловую экономичность работы агрегатов. Однако результаты внедрения таких режимов, получаемые для печей, оборудованных лишь локальными системами температурной стабилизации, не являются наилучшими даже в случае самого квалифицированного «ручного» управления. Как показывает практика, наибольшая экономия топлива достигается при вводе в постоянную эксплуатацию систем автоматизированного управления технологическим процессом (АСУ ТП) нагрева металла.

Системы, в которых функции оператора-нагревальщика выполняет управляющая вычислительная машина (УВМ), позволяют вскрыть дополнительные резервы экономии топлива за счет более гибкого и своевременного управления.

Экономия топлива от применения УВМ по разным оценкам лежит в диапазоне 3-15 % и объективно зависит от двух производственных факторов: ритмичности работы прокатного оборудования и уровня тепловой нагруженности печи, которая характеризуется температурой уходящих газов. Так, для нагревательных кольцевых печей трубопрокатного производства, ожидаемая экономия топлива при коэффициенте рабочего времени стана 0,7-0,75 и средней температуре уходящих из печи газов порядка 900 °С составляет 6,7 %. Фактический же эффект составляет 10 %. Это говорит о том, что конечный результат зависит также от эффективности алгоритмического и программного обеспечения, от надежности поддерживающих информационных и аппаратурных средств [18.1; 18.25].

Те дополнительные возможности, которые могут быть реализованы лишь посредством компьютерного управления, определяются структурой системы управления в целом и являются суммой вкладов отдельных ее функциональных элементов. В связи с этим целесообразно рассмотреть структуру АСУ ТП, обладающую необходимым комплексом функциональных возможностей и отражающую специфику технологического процесса нагрева металла (см. рис. 18.154). Для того чтобы лучше проследить непосредственное влияние отдельных функциональных узлов на экономию топлива, проведем рассмотрение структуры системы с точки зрения возникающих при этом новых возможностей по управлению процессом.

Эта схема является конкретным развитием функциональной схемы АСУ ТП (см. п. 18.2, рис. 18.3) применительно к процессам нагрева [18.10; 18.32; 18.45].

Информационно-измерительная система (блок 1, рис. 18.154) осуществляет в условиях помех ввод, диагностику и первичную обработку всех дискретных и аналоговых сигналов с объекта, которые по своему содержательному смыслу можно разделить на три группы: d_1 – данные о металле и технологические требования по его обработке; x – аналоговая информация, отражающая температурное состояние процесса нагрева металла; u – управляющие воздействия в виде аналоговых сигналов о расходах топлива и воздуха в зонах печи. В процессе функционирования блока 1 формируется обработанный массив данных об измеряемых входах и выходах процесса y , который включает в себя файл данных о расположении и времени пребывания групп заготовок в печи, прошедших входную фильтра-

цию зашумленные составляющие векторов состояния процесса x и управляющих воздействий u .

Обеспечение информационно-измерительной системой слежения за временем пребывания различных групп заготовок в печи, регистрации и обработки данных о расходах топлива позволяет перейти на качественно новый уровень учета удельных затрат топлива. Главный эффект здесь состоит в существенном повышении достоверности и объективности получаемых данных. Кроме того, имеется хорошая возможность накопления статистических данных. Указанные информационные возможности позволяют теплотехническим службам и службам нормирования предприятий точнее анализировать эффективность топливоиспользования на местах и, в целом, способствуют совершенствованию механизма образования плановых норм.

Система оценивания состояния процесса функционально состоит из блоков 2 и 3 (см. рис. 18.154). Результатом работы системы является вектор оценок температурного состояния металла \hat{x} на данный момент времени. Для того чтобы получить наиболее представительную оценку в данной системе используются измерения, отражающие состояние объекта и математическая модель процесса нагрева металла с настраиваемыми параметрами α . Косвенные температурные измерения, как правило, ограничены и используются в алгоритме оценивания для корректировки решения дифференциального уравнения, описывающего эволюцию процесса, в случае возрастания роли неучтенных возмущающих воздействий, а также динамического несоответствия нестационарных процессов теплопередачи в модели и реальном процессе.

В случае возрастания измерительных помех и технологических шумов оценка состояния процесса в большей степени определяется математической моделью. Для осуществления указанной корректировки используется вектор параметров $\hat{\rho}$, периодически настраиваемый (блок 3, рис. 18.154) в зависимости от параметров модели α и соответствия модельной оценки \hat{x} текущим температурным измерениям, входящим в y . Поскольку точность оценки температурного состояния металла по длине печи имеет, как отмечалось выше, прямое влияние на качество управления, а следовательно и на экономичность нагрева, целесообразно указать особенности математической модели, наиболее полно отвечающей поставленной задаче.

Математическая модель процесса. Уже в конце 70-х и начале 80-х годов прошлого века в практике АСУ ТП нагревательных печей окончательно утвердился детерминированный подход моделирования процессов нагрева в реальном масштабе времени. Ядром модели при этом являлось численное решение одно- и двухмерного уравнения теплопроводности. Для задания граничных условий в большинстве работ используются показания зонных датчиков температуры и закон Стефана–Больцмана. Такой подход достаточно прост, но требует больших экспериментальных затрат на стадии предварительного определения эффективного коэффициента излучения, в качестве параметра модели процесса α (см. рис. 18.154). Кроме того, имеются определенные трудности подстройки этого коэффициента во время глубоких переходных процессов вследствие локального характера лучистого теплообмена в месте установки зонного датчика температуры.

Как отмечалось, с целью повышения точности и универсальности модели реального времени под руководством автора были разработаны многозональные, в том числе и динамическая модель проходных нагревательных печей, являющиеся развитием предложенной В. Г. Лисиенко статической модели нагрева движущегося массивного металла [18.1]. В динамической модели граничные условия при моделировании нагрева металла определяются при совместном решении уравнения теплопроводности для массивных тел (заготовки, кладка, транспортирующие элементы) и системы нелинейных уравнений теплового баланса и радиационно-конвективного теплообмена для выделенных объемных зон продуктов сгорания [18.1].

Динамическая модель на основе измеряемых расходов топлива и воздуха в зонах управления, а также данных о продвижении металла в печи позволяет рассчитывать поля температур в заготовках, элементах кладки и газовом объеме печи. Параметрами динамической модели являются неучтенные тепловые потери для каждой зоны управления и степень черноты металла. Для обеспечения наилучшей оценки процесса, а также с целью аварийного контроля температуры металла в периоды потери информации предлагалось использовать систему пирометрических датчиков. При указанном подходе текущая оценка состояния процесса наиболее надежна, так как контроль траектории нагрева металла осуществляется в нескольких точках по длине печи. С другой стороны, динамическая модель более точно определяет граничные условия для моделирования теплопроводности в различных динамических ситуациях.

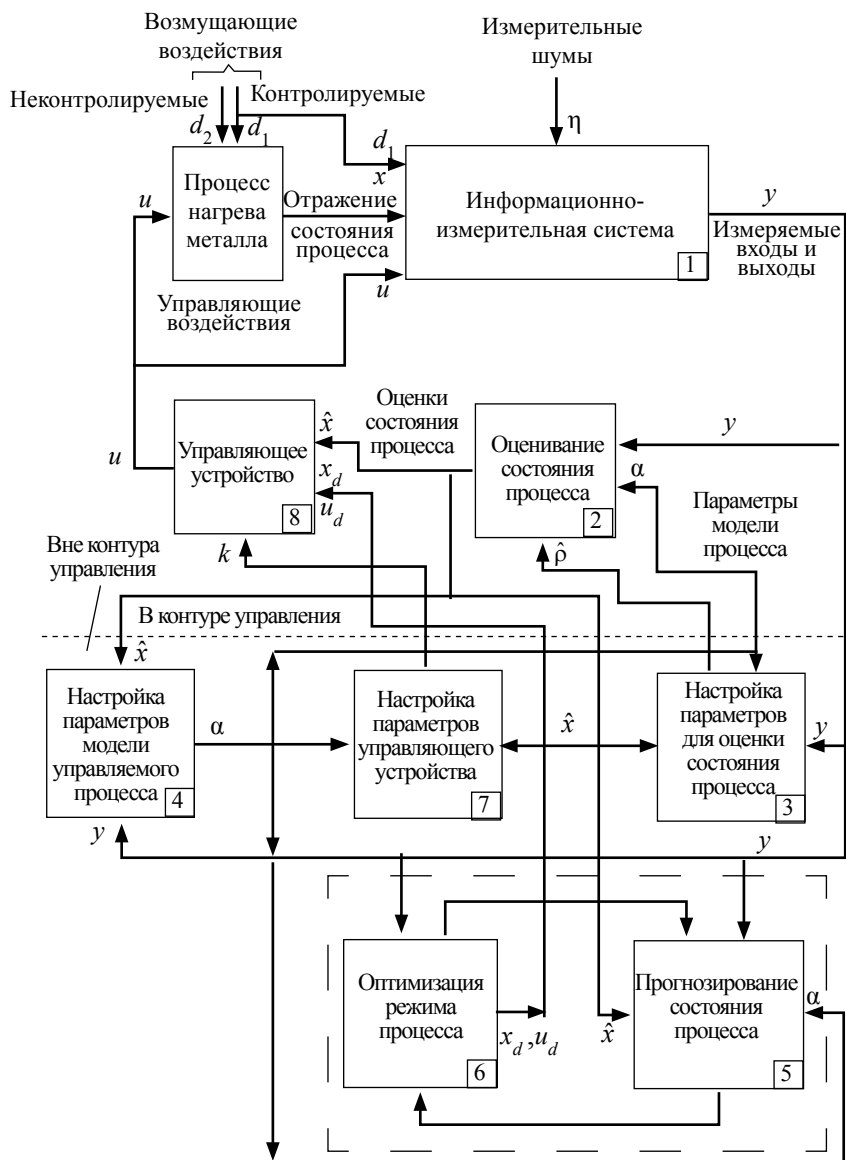


Рис. 18.154. Развиваемая функциональная схема управления при процессах нагрева

Этот подход при построении детерминированных моделей нагрева металла находит все большее применение для проходных печей.

Четкость постановки задачи и получаемых результатов способствует развитию моделей в плане более подробного описания геометрических особенностей моделируемых объектов, а также учёта процессов окалино-образования и безуглероживания металла.

Идентификация управляемого процесса (блок 4, см. рис. 18.154) в случае использования динамической модели процесса нагрева сводится к настройке параметров модели (степени черноты и неучтенные потери тепла) вследствие дрейфа ряда тепловых характеристик печи в процессе эксплуатации (износ теплоизоляции транспортирующих элементов, изменение радиационных свойств кладки, увеличение потерь теплопроводностью и др.). Корректировка параметров модели проводится по результатам объективных измерений: среднемассовой температуре металла на выдаче из печи, а также по температуре отходящих газов. Кроме того, сведение полного теплового баланса печи позволяет проводить дополнительную диагностику измеряемых величин (температур и расходов) и, таким образом, своевременно обнаружить отклонения в показаниях приборов.

Оптимизация режима процесса для таких инерционных объектов, как проходная печь, должна проводиться на основании результатов прогнозирования времени пребывания различных групп металла, в печи. После того, как среднее для каждой зоны время пребывания металла в печи определено, с учетом текущего состояния процесса \hat{x} и требований технологии (содержатся в y) может быть найден оптимальный на ближайшее будущее тепловой u_d и температурный x_d режимы (блоки 5 и 6, см. рис. 18.154).

Оптимизационная процедура при этом строится как итерационная (см. рис. 18.154) с использованием динамической модели в режиме предсказания и организации на этой основе внутренней (алгоритмической) обратной связи при выборе оптимального по расходу топлива теплового режима. Для обеспечения необходимого быстрого действия в качестве алгоритма выбора распределения топлива по длине печи (прямая связь) используется простейшая модель процесса, построенная на соотношениях противоточного теплообменника. Выбор режима осуществляется по двум обобщенным параметрам простейшей модели: обобщенному ограничению на максимально допустимую температуру кладки $t_{\text{к. max}}$ и напряжению поверхности нагрева f .

Величина $t_{к.маx}$ является обобщенной, поскольку ее физический смысл зависит от технологии нагрева. Например, для нагревательных печей прокатных станов величина $t_{к.маx}$ определяется термической стойкостью кладки печи, либо требованиями – к необходимым качествам нагрева. Напряжение поверхности нагрева определяется как $f = H/P$, где P – производительность печи, а H – взаимная поверхность радиационного обмена нагреваемого металла с печными газами и футеровкой печи. При одностороннем нагреве слябов величина f совпадает с напряжением активного пода. В случае нагрева заготовок различной формы параметр f пропорционален удельному времени нагрева и обобщает указанные характеристики процесса.

Роль математической модели, как звена обратной связи, заключается в проверке реализуемости выбранного по текущим значениям $t_{к.маx}$ и f теплового режима с точки зрения удовлетворения температурным (по кладке) и технологическим (равномерность нагрева) ограничениям. В случае нарушения ограничений соответствующим образом корректируется величина $t_{к.маx}$ и этап проверки повторяется вновь.

Методика оптимизации с использованием внутренней обратной связи позволяет учесть динамику объекта (печи) и, таким образом, минимизировать потери тепла с отходящими газами на каждом шаге по времени. Такая «динамическая» оптимизация является еще одной дополнительной возможностью экономии топлива, которая не может быть реализована по стационарным (заданным) тепловым режимам, даже при использовании УВМ.

Управляющее устройство (блок 8, см. рис. 18.154) посредством использования оптимального закона регулирования и внешней обратной связи \hat{x} приводит процесс к заданному температурно-тепловому режиму (x_d и u_d). Значения параметров управляющего устройства (настроек регуляторов) могут быть переменными во времени и настраиваться наилучшим образом по текущей оценке состояния процесса \hat{x} и параметров его модели α (блок 7, рис. 18.154). Оптимизация переходного процесса регулирования, которая при этом достигается, благоприятным образом сказывается на величине топливных затрат при переводе процесса из одного состояния в другое. Существенную роль, при этом, играет то, что для внешней обратной связи используется недоступная прямым измерениям рас-

четная оценка средне-массовой температуры металла [18.33], наиболее верно характеризующая динамику управляемого процесса. При этом определенную помощь оказывает использование фильтра Кальмана-Бьюси при его применении для оценки полей температуры в нагреваемом материале [18.33].

Необходимо отметить еще один эффект, который является следствием установки ЭВМ на промышленном объекте. Использование цифровой обработки измерительной информации позволяет получить в качестве наблюдений наиболее близкие управляемому процессу (нагреву металла) расчетные характеристики. Для нагревательных печей одной из важнейших таких характеристик является температура поверхности металла. В настоящее время в России и за рубежом апробированы ряд способов определения этой характеристики с использованием системы распределенных датчиков и обработкой результатов измерений на микро-ЭВМ. Непосредственный контроль температур поверхности металла увеличивает надежность оценки траектории среднемассовой температуры, а также делает инвариантной систему оценивания (блоки 2 и 3, см. рис. 18.154) относительно различных конструкций проходных печей. В частности, в [18.2] описан метод измерения температуры поверхности металла в процессе его нагрева, основанный на системе пирометрических датчиков (см. [18.2, рис. 13.128–13.130 и формулу (13.89)]).

Решение проблем управления нагревом металла позволяет увеличить производительность процессов, снизить расход топлива и окалинообразование, улучшить качество нагреваемого металла, обеспечивая при этом эффективную работу печи «в темпе» с процессом обработки металла давлением.

18.8.5. Совершенствование системы управления и конструкций проходных термических печей

Конструкции и системы управления

В работах авторов с коллегами были определены основные положения подхода к усовершенствованию конструкций, тепловых режимов и автоматизации промышленных печей, печей XXI века. Развитие этих положений определяется следующими обстоятельствами [18.247–18.249].

1. Возросли требования к равномерности нагрева. Эти требования касаются в равной степени как статической неравномерности –

по объему садки, по сечению заготовки, так и динамической – динамических отклонений температуры в результате внесения возмущающих воздействий и работы регуляторов-стабилизаторов.

2. Возросли также требования к материалам футеровки печей и технологических агрегатов. Эти требования предусматривают прежде всего увеличение стойкости футеровки, снижение ее аккумулирующей способности, уменьшение сроков сооружения печей, снижение эксплуатационных затрат.

3. Расширились возможности горелочных устройств как в выборе технического оснащения, так и в оснастке. Это прежде всего автоматизированное импульсное отопление, обеспечение автоматическим розжигом, контролем пламени, как правило, индивидуальные запорные и регулирующие исполнительные органы, высокий подогрев воздуха.

4. Возросли требования к автоматизации горелочных устройств в совокупности с управлением тепловыми режимами печи. При этом предусматривается использование быстродействующих управляющих устройств для горелок импульсного отопления, современных цифровых регуляторов, использование контроллеров с разветвленными возможностями программного управления, создание эффективного информационного обеспечения функционирования печи.

5. Кардинально изменились и требования к проектированию и реконструкции печей. Если не прибегать к прямой поставке полностью зарубежного оборудования иностранных фирм «под ключ», а пытаться использовать в качестве генерального подрядчика отечественные фирмы, то их ответственность существенно возрастает, конкурентный риск здесь уже очень велик. При этом становится крайне необходимым проведение предпроектных модельных исследований с использованием самых современных математических моделей и программных средств, с выявлением особенностей и оптимальных условий работы проектируемых печей.

Практическая реализация рассмотренных положений была использована, в частности, для усовершенствования алгоритмов управления, конструкций и тепловых режимов печей заковки и отпуска с шагающими балками – одного из этапов линии термообработки трубной заготовки, установленной в Финишном центре Первоуральского новотрубного завода, г. Первоуральск, Свердловская обл. Основная часть работ под руководством Ю.К. Маликова

выполнена ООО «Газ-инжиниринг» с участием авторов, представляющих НИЦПЭА УрФУ, активное участие в работе принимал А.А. Титаев. В цехе данного завода была установлена линия финишной обработки труб, состоящая из нескольких этапов. Назначением линии является термическая обработка труб для достижения механической характеристики в соответствии с требованиями API и ГОСТ. Ключевыми этапами линии являются две печи, предназначенные для термообработки заготовки при высоких температурах.

Термообработка трубной заготовки включает в себя два этапа. Первый этап – нагрев заготовки до 850–1000 °С в нагревательной печи. Далее заготовка выдается из печи и проходит через гидросбив, сбивающий окалину, и водяной спреер, обеспечивающий скоростное охлаждение трубы до температур, близких к нормальным условиям. После выдачи из спреера труба поступает в отпускную печь, где происходит ее нагрев до температур 480-750 °С и последующая выдержка при данных температурах в течение определенного технологией времени.

Приведем основные теплотехнические параметры объекта на примере отпускной печи (табл. 18.31).

Таблица 18.31

Технические данные термической отпускной печи

Параметр	Характеристика
Температура загружаемой заготовки	20–50 °С
Равномерность распределения температуры по сечению заготовки	± 5 °С
Топливо	Природный газ $BQ_n^p = 34,74 \pm 5 \text{ \% МДж/м}^3$
Расход топлива	600 м ³ /ч
Внутренние размеры печи	
Длина	25,76 м
Ширина	13 м
Высота	2,2 м

Рабочее пространство печи представляет собой прямоугольную замкнутую полость длиной 25 м и высотой 2,2 м с тремя пережимами, высота которых составляет 1,3 м. В нижней части печи по всей ее длине расположены шагающие балки, ориентированные

вдоль длинной стороны печи. С одного конца в печь с помощью подающего рольганга и вталкивающего механизма загружаются трубы. Укладка труб происходит на балки в один ряд перпендикулярно направлению движения труб в печи. От момента загрузки до момента выгрузки трубы перемещаются по печи с постоянной скоростью, определяемой темпом шагания балок. Шаг балок является величиной, по которой естественным образом можно дискретизировать время пребывания трубы в печи и определить ее координату в печи в текущий момент времени. Таким образом, всевозможные положения трубы в печи разбиваются на ряд позиций от первой до позиции с номером 146 (номинальная емкость печи). При достижении трубой последней позиции она перемещается на разгрузочный рольганг и удаляется из печи.

Продольный разрез отпускной печи представлен на рис. 18.155.

Конструктивным решением и технологическими инструкциями предусмотрен нагрев металла в зонах I, I', II. К концу зоны II металл должен приобрести температуру выдержки, при которой будет проходить через оставшиеся зоны. Регулирование температуры в зонах I', II', III' выполняется с помощью импульсных высокоскоростных горелок ВИС 100 и ВИС 140.



Рис. 18.155. Конструкция термической отпускной печи:
I, II, III – зоны печи; I', II', III' – зоны регулирования

В печи, таким образом, предусмотрены 3 зоны регулирования, расположенные по длине печи (на рис. 18.155 зоны I', II', III'). Каждая из зон содержит 4 подзоны регулирования, расположенных по ширине печи. Подзона регулирования содержит 6 высокоскоростных импульсных горелок, по 3 на каждой из противоположных стен

зоны, управляемых ПИ-регулятором. Сигналом обратной связи для регулятора является сигнал установленной в верхней части подзоны термопары (по одной на каждую из четырех подзон). Горелки используют в качестве топлива природный газ. Давление в печи поддерживается контуром регулирования (с помощью заслонки на дымовой трубе) около значения 1 бар. Дымоудаление происходит через окна под загрузочным рольгангом. Загрузка трубы в печь выполняется водоохлаждаемыми роликами.

Тепловая мощность печи составляет 5,51 МВт (4,480 Мкал/ч), что позволяет обеспечивать производительность (при нагреве металла от 20 °С до 700 °С), равную 28 т/ч.

Технические характеристики закалочной печи аналогичны.

В результате модернизации данных печей были проведены следующие усовершенствования, в основном в части датчиков и системы управления:

а) в конструктивном плане:

Установка газоанализатора продуктов сгорания в дымоходном тракте печи заковки (см. ниже).

2. Установка 8 стационарных пирометров в своде отпускной печи и одного пирометра в своде закалочной печи. Схема установки позволяет составить максимально полную картину распределения температуры металла, находящегося в печи, в любой момент времени.

б) в плане модернизации алгоритма управления:

Внедрение алгоритма регулирования подсосов в печь путем анализа содержания кислорода в отходящих дымовых газах печи заковки.

Контроль температуры трубы при ее прохождении по каждому участку печи отпуска путем анализа температуры трубы, измеряемой пирометрами.

При конструировании обеих печей были использованы усовершенствованные алгоритмы работы всех подсистем управления тепловым режимом печей. Однако в процессе эксплуатации были выявлены случаи значительного образования окалины на обрабатываемых трубах, что говорит о неэффективности управления давлением в закалочной печи и больших объемах подсосов холодного воздуха. С целью оценки величины подсосов был применен контроль содержания кислорода в отходящих дымовых газах посредством установки на дымоходном тракте печи газоанализатора. Система

газового анализатора включает в себя патрубок для отбора дымовых газов, непосредственно соединенный с пространством дымохода, непрерывно работающий вентилятор для помещения пробы дымовых газов в камеру анализа и газоанализатор, определяющий процентное содержание кислорода в пробе дымовых газов. На основании измеренных значений концентрации кислорода, а также с учетом расходов газа и воздуха через горелки, был вычислен расход дыма и определены величины подсосов холодного воздуха.

Исходя из полученных результатов, была предложена и реализована схема управления газодинамическим режимом печи, основанная, в отличие от классической, на поддержании величины подсосов на минимальном уровне. В этом случае контур регулирования целесообразно построить на использовании газоанализатора кислорода (в качестве сигнала обратной связи) и положении заслонки в дымовом тракте печи (в качестве исполнительного механизма). Данный способ управления применен на практике и показал удовлетворительные результаты не только по содержанию кислорода и величине подсосов, но и по стабильности внутripечного давления.

Другим существенно важным аспектом процесса термообработки трубы является определение динамики нагрева в нагревательной зоне отпускной печи. Этот параметр влияет на общее время нагрева трубы в печи, что в свою очередь при заданной скорости прохождения заготовки через печь, определяет время ее выдержки при заданной температуре. Правильно выбранный темп шагания балок и температуры зон регулирования позволяют добиться на выходе из печи необходимых механических и прочностных свойств материала трубы. Подбор темпа и температур с использованием натурального эксперимента не представляется возможным вследствие значительных требуемых затрат по материалам и времени. Сортаменты труб многообразны, и для каждого из них требуется определить свои параметры термообработки. Выходом в этой ситуации может стать построение и использование математической модели, адекватно отражающей физические процессы, происходящие в печи. Использование моделирования нагрева позволяет обойтись без привлечения материальных ресурсов в процедуре определения параметров термообработки, а также значительно сократить время и число реальных экспериментов, требуемое для разработки данной технологии нагрева.

Для вышеописанных целей была использована динамическая зонально-узловая (ДЗУ) математическая модель [18.2] применительно к термической отпусковой печи. Создание модели включало в себя несколько этапов:

1. Создание геометрической конфигурации теплоизлучающих и тепловоспринимающих поверхностей.
2. Разделение всех поверхностей на зоны и задание теплофизических характеристик каждой зоны, выделение объемных зон в системе.
3. Определение источников и величин подвода и отвода теплоты для всех поверхностных и объемных зон системы.
4. Составление системы уравнений теплового баланса для каждой из поверхностных и объемных зон системы.
5. При постановке требуемой цели либо нахождение зональных температур и потоков, обеспечивающих устойчивое равновесие системы, либо определение динамического изменения температуры каждой зоны в зависимости от величины поступающего или отходящего от нее теплового потока.

Точная настройка модели выполнялась на основе информации, полученной от стационарных пирометров, установленных в своде печи над металлом в различных точках пространства печи.

Применение данной модели позволило определить зависимость температуры металла в каждой точке печи и длительности нахождения его при изотермической выдержке от различных параметров работы печи (производительности, расхода природного газа). На основе определенных зависимостей стала возможным выдача рекомендаций по режиму работы печи, обеспечивающих требуемую длительность изотермической выдержки металла и требуемую температуру металла на выходе из печи.

Современные конструкции проходных термических печей предусматривают усложнение режимов нагрева и термообработки. В этом плане усовершенствованная система контроля и автоматизации термических печей с шагающими балками, позволила обеспечить стабильность работы печи, снизить угар металла и добиться равномерного прогрева металла в пространстве отпусковой печи необходимых свойств металла после отпуска.

Дополнительно более детально рассмотрена разработка и внедрение на проходной термической печи нового способа регулирования газоплотности рабочего пространства печи.

Способ регулирования газоплотности рабочего пространства энерготехнологических агрегатов

Этот способ был разработан В. Г. Лисиенко, Ю.К. Маликовым и А.А. Титаевым в процессе совершенствования управления проходной термической печи [18.250].

Известен способ регулирования газоплотности рабочего пространства, при котором подсосы воздуха в рабочее пространство регулируют путем поддержания давления под сводом агрегата, обычно в пределах 8–20 Па (0,8–2,0 мм вод. ст.). При этом регулирование давления в рабочем пространстве осуществляют путем перемещения заслонки или шиберы, перекрывающих дымовой тракт агрегата. Данный способ включает в себя задание требуемого давления в рабочем пространстве агрегата, измерение давления в рабочем пространстве агрегата, сравнение измеренного значения с заданным, в случае обнаружения отклонения измеренного значения от заданного формирование управляющего воздействия на шибер или заслонку в дымовом тракте, позволяющего устранить выявленное отклонение давления.

Также был известен способ регулирования давления колошниково-го газа доменных печей, при котором давление колошниково-го газа также поддерживают регулированием шиберы

Однако недостатком этих способов являлась трудность подбора необходимого давления газов для устранения или минимизации величины подсосов атмосферного воздуха в рабочее пространство агрегатов, вызванная отсутствием полной герметичности корпуса агрегата, открытием и закрытием рабочих окон, наличием пульсаций при включении и выключении горелочных устройств. При этом даже небольшое изменение давления в рабочем пространстве агрегата и перемещение заслонки в дымовом тракте агрегата может вызвать значительный приток атмосферного воздуха в рабочее пространство агрегата. Это приводит к охлаждению рабочего пространства, снижению теплового КПД, увеличению расхода топлива, а также к повышенному окислению металлических элементов агрегата (нагреваемый металл, трубчатые поверхности паропроводов и т. д.)

Задачей настоящего изобретения является устранение подсосов холодного атмосферного воздуха в рабочее пространство энерготехнологических агрегатов, повышение теплового КПД, снижение

расходов топлива и устранение коррозии элементов рабочего пространства агрегатов.

Эта задача решалась следующим образом. В известном способе регулирования газоплотности рабочего пространства энерготехнологических агрегатов, включающем задание требуемого давления в рабочем пространстве агрегата, измерение давления в рабочем пространстве агрегата, сравнение измеренного значения с заданным, в случае обнаружения отклонения измеренного значения от заданного формирование управляющего воздействия на шибер или заслонку в дымовом тракте, позволяющего устранить выявленное отклонение давления, после измерения давления в рабочем пространстве агрегата измеряют концентрацию кислорода в отходящих дымовых газах, расход топлива и коэффициент избытка воздуха по соотношению «топливо-воздух для горения», после чего определяют величину подсосов атмосферного воздуха в рабочее пространство агрегата, определяемую по формуле:

$$G_{\Pi} = G_R \left[\frac{C_K V_0}{0,21 - C_K} - (\alpha - 1) L_0 \right], \quad (18.323)$$

где G_{Π} – объем подсосов атмосферного воздуха, м³/ч; G_R – расход топлива, м³/ч; C_K – концентрация кислорода в продуктах сгорания, объемные доли; α – коэффициент избытка воздуха по соотношению «топливо-воздух для горения»; L_0 и V_0 – теоретически необходимое для горения 1 м³ топлива количество воздуха и теоретический выход продуктов сгорания на 1 м³ топлива соответственно, м³/м³, и корректируют задание давления в рабочем пространстве агрегата до достижения величины подсосов атмосферного воздуха, равной нулю ($G_{\Pi} = 0$).

Таким образом, в предложенном способе регулирования газоплотности проводится корректировка задания регулятора давления под сводом с целью устранения подсосов атмосферного воздуха в рабочее пространство агрегата. При этом регулирующим воздействием является изменение положения заслонки или шиберов в дымовом тракте агрегата.

Основой информации для корректирующего регулятора и одновременно его входной величиной является при этом непосредствен-

но величина самих подсосов атмосферного воздуха. Эта величина G_{Π} определяется из следующих балансовых соотношений.

Расход отходящих продуктов сгорания $G_{\text{Д}}$ определяется соотношением

$$G_{\text{Д}} = V_{\alpha} G_{\Gamma} + G_{\Pi} = [V_0 + (\alpha - 1)L_0]G_{\Gamma} + G_{\Pi}, \quad (18.324)$$

где G_{Γ} – расход топлива, например, природного газа, м³/ч; α – коэффициент расхода воздуха, определяемый на горелке регулятором соотношения «топливо-воздух для горения»; V_{α} , V_0 и L_0 – теоретические выход продуктов сгорания, при $\alpha \neq 1$, при $\alpha = 1$ и необходимый расход воздуха для горения при $\alpha = 1$ соответственно, м³/м³.

За счет избытка воздуха, подаваемого на горение при $\alpha > 1$, расход избыточного воздуха в отходящих продуктах сгорания равен

$$G_{\text{В}}^{\alpha} = G_{\text{Р}} L_0 (\alpha - 1). \quad (18.325)$$

Тогда концентрация кислорода в отходящих продуктах сгорания равна

$$C_{\text{К}} = \frac{0,21(G_{\text{В}}^{\alpha} + G_{\Pi})}{C_{\text{Д}}} = \frac{0,21[G_{\Gamma} L_0 (\alpha - 1) + G_{\Pi}]}{[V_0 + (\alpha - 1)L_0]G_{\Gamma} + G_{\Pi}}. \quad (18.326)$$

Решая уравнение (18.326) относительно величины G_{Π} , получили

$$G_{\Pi} = G_{\Gamma} \left[\frac{C_{\text{К}} V_0}{0,21 - C_{\text{К}}} - (\alpha - 1)L_0 \right]. \quad (18.327)$$

Из формулы (18.327) следует, что для определения величины подсосов атмосферного воздуха необходимо определить с помощью датчика концентрацию кислорода в отходящих продуктах сгорания $C_{\text{К}}$, задать известные для применяемого топлива справочные величины V_0 и L_0 и отследить определяемую регулятором «топливо-воздух для горения» величину коэффициента избытка воздуха α .

Способ, таким образом, предусматривал, что при наличии регулирования соотношения «топливо-воздух для горения» определяется величина коэффициента избытка воздуха α , и определяется концентрация кислорода в отходящих продуктах сгорания для корректировки задания регулятора давления под сводом агрегата с

целью устранения подсосов атмосферного воздуха в рабочее пространство. При этом входной величиной корректирующего регулятора является величина подсосов атмосферного воздуха, определяемая в вычислительном устройстве по формуле (18.137), а заданием корректирующему регулятору является величина, определяемая отсутствием подсосов, т. е.

$$G_{\Pi} = G_{\Pi}^{\text{зад}} = 0. \quad (18.328)$$

Однако в определенных условиях при увеличении давления под сводом рабочего пространства $P_{\text{св}}$ возникает возможность значительного выбивания продуктов сгорания из рабочего пространства агрегата, что затрудняет работу агрегата и обслуживающего персонала. В этом случае вводят ограничение на максимальную величину давления под сводом рабочего пространства агрегата, обычно не превышающую величин

$$P_{\text{св max}} = 12 - 20 \text{ Па (1,2 - 2,0 мм вод. ст.)}.$$

С учетом этих обстоятельств условие (18.328) заменяется на следующие ограничения $P_{\text{св}} \leq P_{\text{св max}}$; $G_{\Pi} = G_{\Pi \text{ min}}$, т. е. при этом достигается минимально возможная в данных условиях величина подсосов атмосферного воздуха $G_{\Pi \text{ min}}$ при максимально допустимом давлении под сводом $P_{\text{св max}}$. В этом случае предварительно кроме задания давления в рабочем пространстве агрегата дополнительно задают максимально допустимое для агрегата значение давления в рабочем пространстве $P_{\text{св max}}$, а при формировании коррекции на задание давления в случае достижения измеренным давлением максимального значения $P_{\text{св}} = P_{\text{св max}}$ коррекцию останавливают.

Как отмечалось, наличие подсосов атмосферного холодного воздуха в рабочее пространство агрегатов приводит к снижению температуры в рабочем пространстве, уменьшению теплового КПД, увеличению расхода топлива, а также к окислительной коррозии элементов рабочего пространства и нагреваемого материала.

Реализация способа представлена устройством на примере нагревательной печи (см. рис. 18.156).

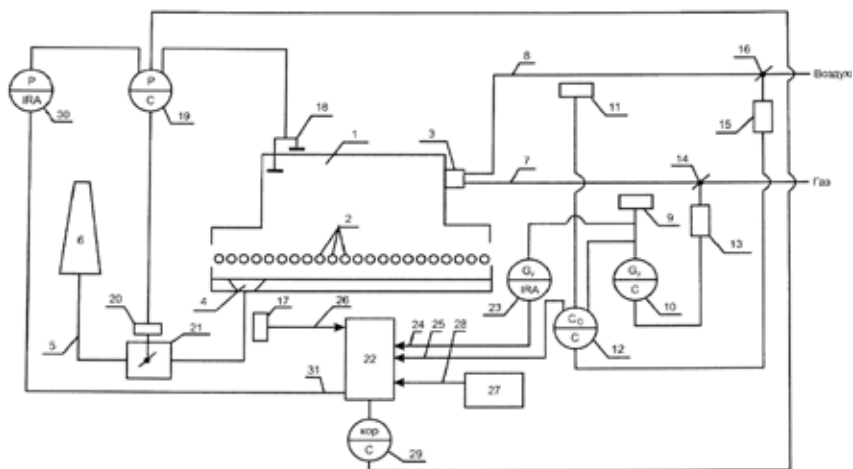


Рис. 18.156. Регулирование газоплотности рабочего пространства на примере нагревательной печи:

1 – рабочее пространство; 2 – нагреваемый материал; 3 – горелочное устройство; 4 – канал отходящих продуктов сгорания; 5 – дымоход; 6 – дымовая труба; 7, 8 – подводы топлива и воздуха; 9 – датчик расхода топлива; 10 – регулятор расхода топлива; 11 – датчик расхода воздуха; 12 – регулятор соотношения «топливо-воздух»; 13, 14 – исполнительный механизм и регулирующий орган расхода топлива; 15, 16 – тоже, расхода воздуха; датчики: 17 – концентрация кислорода; 18 – давления под сводом; 19 – регулятор давления под сводом; 20 – заслонка в дымоходе; 21 – исполнительный механизм; 22 – вычислительное устройство; 23 – расходомер подачи газа; 24 – расход топлива; 25 – соотношение «топливо-воздух»; 26 – концентрация кислорода в продуктах сгорания; 27 – банк данных; 28 – ручной ввод; 29 – корректирующий регулятор; 30 – измерительное устройство давления под сводом; 31 – ввод данных о давлении под сводом в вычислительное устройство 22; C – регулятор; IRA – показывающий, регистрирующий и сигнализирующий вторичный прибор; кор – корректирующий регулятор; G_T – расходомер топлива; C_0 – регулятор соотношения «топливо-воздух для горения»; P – давление под сводом

Оно включает: рабочее пространство 1, нагреваемый материал 2, горелочное устройство 3, канал отходящих продуктов сгорания 4, дымоход 5, дымовую трубу 6, подводы топлива 7 и воздуха 8, датчик расхода топлива 9, регулятор расхода топлива 10, датчик расхода воздуха 11, регулятор соотношения «топливо-воздух для горения» 12, исполнительный механизм 13 и регулирующий орган 14 расхода топлива, исполнительный механизм 15 и регулирующий орган 16 расхода воздуха, датчик концентрации кислорода 17, датчик давле-

ния под сводом 18, регулятор давления под сводом 19, заслонка в дымовом тракте 20, исполнительный механизм регулирования положения заслонки в дымовом тракте 21, вычислительное устройство 22, расходомер подачи газа 23, ввод данных в вычислительное устройство 22 (о расходе топлива 24, о соотношении «топливо-воздух для горения» 25, о концентрации кислорода в продуктах сгорания 26, ручной ввод данных 28 из банка данных 27), корректирующий регулятор 29, вторичное измерительное устройство давления под сводом 30. ввод данных о давлении под сводом 31 в вычислительное устройство.

В рабочее пространство печи, в котором нагревается материал, через горелочное устройство подается природный газ и воздух для горения, продукты сгорания удаляются через канал отходящих продуктов сгорания и дымоход в дымовую трубу. Определение расходов газа и воздуха для горения осуществляется соответствующими датчиками, а регулирование их расходов - исполнительными механизмами и регулирующими органами. Автоматическое регулирование расхода природного газа осуществляется регулятором расхода топлива, а расхода воздуха - регулятором соотношения «топливо-воздух для горения», определение концентрации кислорода в продуктах сгорания осуществляется датчиком концентрации кислорода. Давление под сводом измеряется соответствующим датчиком. Регулирование давления с помощью исполнительного механизма регулирования положения заслонки в дымовом тракте осуществляется регулятором давления.

В вычислительное устройство вводятся данные: о расходе газа, о концентрации кислорода в продуктах сгорания, о соотношении «газ-воздух для горения», и посредством ручного ввода данные о теоретически необходимом расходе воздуха на горение L_0 и теоретическом выходе продуктов сгорания V_0 . В вычислительном устройстве по формуле (18.327) определяется величина подсосов атмосферного воздуха G_{π} , и эти данные поступают в корректирующий регулятор, изменяющий величину задания регулятора давления под сводом так, чтобы величина подсосов была равна $G_{\pi} = 0$. Измеренное с помощью соответствующего датчика давление под сводом через вторичное измерительное устройство давления под сводом поступает на вход вычислительного устройства, где осуществляется сравнение заданной максимальной величины $P_{\text{св max}}$ с физической величиной давления под

сводом $P_{\text{св}}$. В случае превышения давления под сводом заданной величины $P_{\text{св max}}$, т. е. при $P_{\text{св}} \geq P_{\text{св max}}$ работа корректирующего регулятора приостанавливается. При этом достигается величина $P_{\text{св}} = P_{\text{св max}}$, а величина подсосов достигает минимально возможной в реальных условиях эксплуатации величины $G_{\text{п}} = G_{\text{п min}}$.

Пример работы устройства при конкретных физических условиях.

При давлении под сводом нагревательной печи с отоплением природным газом $P_{\text{св}} = 9$ Па (0,9 мм вод. ст.) величина коэффициента избытка воздуха для горения, устанавливаемая регулятором соотношения «газ-воздух для горения», составляет $\alpha = 1,05$, концентрация кислорода в продуктах сгорания составила 3,2 %, а расход природного газа равен 500 м³/ч. Эти величины поступают в вычислительное устройство. В то же устройство вводятся справочные данные для природного газа

$$L_0 = 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ и } V_0 = 10,5 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

При этом по формуле (18.327) величина подсосов атмосферного воздуха составит

$$G_{\text{п}} = 500 \left[\frac{0,032 \cdot 10,5}{0,21 - 0,032} - (1,05 - 1) \cdot 9,5 \right] = 706 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Эта величина $G_{\text{п}}$ поступает из вычислительного устройства на корректирующий регулятор давления под сводом. При задании корректирующему регулятору $G_{\text{п}} = 0$ корректирующий регулятор увеличивает задание на давление под сводом, при этом заслонка на дымовом тракте работает на его частичное перекрытие.

Однако технологическая инструкция устанавливает по условиям выбивания продуктов сгорания из рабочего пространства печи величину максимального давления под сводом $P_{\text{св max}} = 11$ Па (1,1 мм вод. ст.). Это ограничение поступает в вычислительное устройство, которое на этой основе приостанавливает увеличение давления под сводом и снижение задания подсосов атмосферного воздуха до задания $G_{\text{п}} = G_{\text{п min}}$.

Этот пример также иллюстрируется графиками процессов регулирования величины подсосов атмосферного воздуха (см. рис. 18.157), из которых видно, что при $P_{\text{св max}} = 11$ Па (1,1 мм вод. ст.) установилось значение подсосов атмосферного воздуха $G_{\text{п min}} = 200 \text{ м}^3 / \text{ч}$, т. е. величина подсосов атмосферного воздуха в результате регулирования газоплотности печи была снижена в 7 раз.

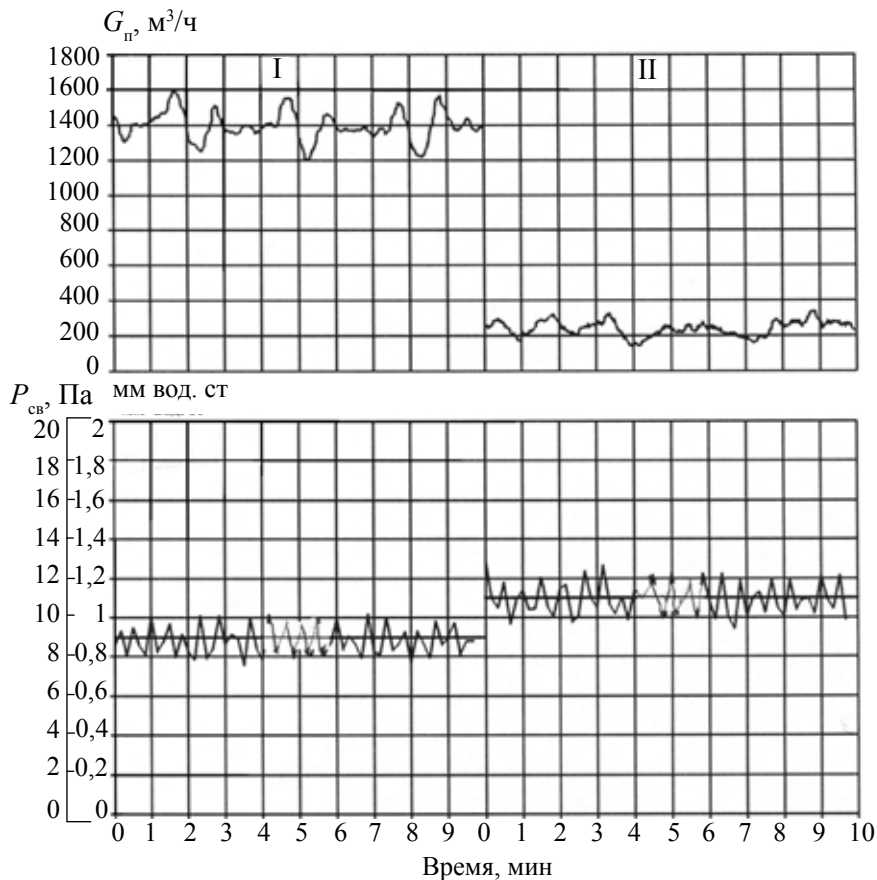


Рис. 18.157. Влияние давления под сводом печи $P_{\text{св}}$ на величину подсосов атмосферного воздуха

G_p : I – $P_{\text{св}} = 9 \text{ Па}$ (0,9 мм вод. ст.); II – $P_{\text{св}} = 11 \text{ Па}$ (1,1 мм вод. ст.)

Использование данного способа обеспечивает снижение подсосов холодного атмосферного воздуха в рабочее пространство печи, повышает тепловой КПД печи, снижает расход топлива и устраняет в данном случае угар нагреваемого металла за счет его окисления избыточным кислородом.

Данный способ внедрен на термической печи Первоуральского новотрубного завода с большим экономическим и технологическим эффектом.

18.8.6. Автоматизация теплового режима камерной термической печи с импульсным отоплением

Как показано в Т. 2, кн. 1 и 2 [18.2, 18.3] данного издания и также в ряде публикаций [18.251; 18.255], ООО «Газ-инжиниринг» при участии Научно-исследовательского Центра Проблем энергосбережения и автоматизации (НИЦ ПЭА) УрФУ была проведена реконструкция термической печи с выкатным подом с установкой автоматизированной системы импульсного отопления печи на ПМТЗ.

В этой работе, проводимой под руководством Ю.К. Маликова и авторов, активное участие принимали К.А. Сурганов, А.А. Титаев, И.Ю. Медведев, Е.Ю. Шахтарин и др.

Огромная роль в постановке и реализации задач реконструкции принадлежит, конечно, Первоуральскому новотрубному заводу.

Система автоматизированного управления и оборудования

Опыт показывает, что импульсное отопление имеет ряд преимуществ перед непрерывным отоплением термических печей периодического действия и считается наиболее эффективным для сложных садов, обрабатываемых в широком диапазоне температур. Вместе с тем, использование импульсного отопления требует соответствующей реконструкции и усложнения системы автоматического управления. В частности, печи с импульсным отоплением должны быть оборудованы специальной системой поддержания положительного относительного давления, а также блоками преобразования непрерывного сигнала задающего воздействия в последовательность импульсов включения горелок системы (блоками импульсной модуляции).

Функциональная схема системы регулирования температуры T с импульсным управлением представлена на рис. 18. 158.

На вход регулятора поступает сигнал ошибки $P_{\text{вх}}$, (величина разницы между фактической $T_{\text{вых}}$ и заданной $T_{\text{зад}}$ температурой объекта управления), а на выходе формируется значение управляющего сигнала мощности $P_{\text{вых}}$. С помощью импульсного преобразователя или блоков импульсной модуляции управляющий сигнал трансформируется в последовательность импульсов и пауз, подаваемую на объект управления. Длительности импульсов и пауз $T_{\text{имп}}$ и $T_{\text{п}}$ зависят от алгоритма работы преобразователя. Нагрев садки проводится

двенадцатью импульсными горелками, максимальный расход топлива – 300 м³/ч, удельный расход теплоты – 2,0 МДж/кг. Для измерения температуры в рабочем пространстве печи используется семь термопар, установленных в сводовой части печи. Для достижения требуемого качества управления печь была условно поделена на 4 зоны, температура в каждой из которых поддерживалась локальными ПИД-регуляторами. В качестве блоков импульсной модуляции использовались устройства циклического управления горелками MPT 700 фирмы Kromschroder. Выходные сигналы регуляторов (проценты мощности зон) подавались на блоки импульсных преобразователей MPT 700 для преобразования в дискретные сигналы включения горелок.

На основе этих управляющих сигналов, а также при использовании некоторые статически заданные параметры блоков (минимальное время включения горелок, минимальная длительность паузы, ширина мертвой зоны и др.) происходило вычисление текущих временных параметров работы каждой горелки. Управление осуществлялось каждой горелкой, подключенной к дискретному выходу MPT, по отдельности. Для обеспечения равномерности нагрева моменты включения горелок были равномерно разнесены во времени.

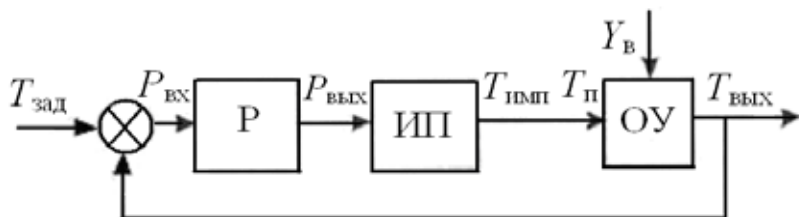


Рис. 18.158. Функциональная схема системы с импульсным управлением:

Р – регулятор; ИП – импульсный преобразователь; ОУ – объект управления; $T_{\text{зад}}$ – заданная температура в печи; $P_{\text{вх}}$ – сигнал рассогласования по температуре; $P_{\text{вых}}$ – выходной сигнал регулятора; $T_{\text{имп}}$, $T_{\text{п}}$ – времена импульсов и пауз в работе горелок; $Y_{\text{в}}$ – сигнал внешних возмущений; $T_{\text{вых}}$ – температура в печи

На начальном этапе при реализации данной системы были выявлены следующие недостатки процесса нагрева, вызванные как особенностями самой печи, так и несовершенством алгоритма управления:

1. Непостоянство свойств объекта управления, влияющая на инерционность процесса регулирования. В данном случае под объектом управления понимается совокупность конструкций печи и обрабатываемой партии металла. В печи изменяется давление газа и воздуха, от садки к садке изменяется начальная температура в зонах печи; масса и структура садки влияет на распределение тепловых нагрузок в печи.

2. Периодические колебания температуры и давления в рабочем пространстве печи, вызванные включениями и выключениями горелок.

3. Зашумленность сигнала обратной связи. В промышленных печах присутствует некоторая погрешность измерения температуры, что в совокупности с резкими и частыми изменениями распределения температур приводят к циклическим скачкам измеренных значений. Эти колебания передаются в сигнал ошибки и, далее, в регулятор, ухудшая управляемость системы.

4. Недостаточная гибкость настроек MPT 700. Не удалось устранить «мертвую зону» – диапазон мощности, при попадании внутрь которого длительности импульсов работы горелок минимальны и не обеспечивают стабильного гидродинамического режима в печи. Вследствие этого имел место подсос холодного воздуха извне, что приводило к появлению локальных областей охлаждения на поверхности металла и негативно влияло на процесс термообработки. Другая проблема выявлялась на участках охлаждения садки. Она заключалась в неспособности MPT 700 обеспечивать требуемую скорость охлаждения вследствие особенностей алгоритма работы.

Учитывая все вышеперечисленные особенности объекта и системы управления, был разработан и реализован проект модернизации автоматизирующего оборудования печи.

Основой автоматического оборудования является микроконтроллер S-314C-2DP фирмы SIEMENS, программно реализующий функции ПИД-регуляторов и импульсных преобразователей. Кроме основных функций управления на микроконтроллер возложены вспомогательные задачи контроля скорости выхода дымовых газов из печи, блокировки безопасности и др.

Вследствие неравномерности тепловых свойств в различных участках садки печь была условно поделена в продольном направ-

лении на три зоны управления. Зоны 1 и 3 отвечают за нагрев концов садки, расположенных вблизи торцов печи, зона 2 – за нагрев основной массы садки в середине печи.

Внутри каждой зоны горелки объединены в группы. Включение и выключение всех горелок одной группы выполняется одновременно. Для равномерности нагрева времена включения групп в пределах цикла сдвинуты друг относительно друга.

Были реализованы следующие режимы. Работа горелок каждой зоны управления возможна в одном из трех независимых режимов, каждый из которых оптимизирован под свою конкретную задачу – быстрый нагрев, медленный нагрев или выдержка, охлаждение. Текущий режим определяется положением электромагнитных вентилей на газо- и воздухопроводах: в первую очередь, воздушного вентиля, который служит для регулирования соотношения газа и воздуха, подаваемых на все горелки, и вентилей на газопроводах горелок.

Степень открытия заслонки дымохода, регулирующей давление, прямо пропорциональна количеству включенных горелок. Этим достигается стабилизация давления в печи.

Управление тепловой нагрузкой осуществляется изменением длительности импульсов включения горелок при постоянном периоде (ШИМ-модуляция). При таком способе управления амплитуда колебаний температуры в печи минимальна по сравнению с ЧИМ- и ЧШИМ-модуляцией. В момент перехода на выдержку выполняется принудительная инициализация выходного сигнала регулятора новым значением, которое выбирается с учетом скорости текущего нагрева и инерционности тепловых свойств металла. Такой метод позволяет регулятору быстрее закончить процессы перехода и существенно снизить величину перерегулирования. Проводится непрерывное считывание значения аналогового выходного сигнала регулятора с соответствующей коррекцией длительности импульсов включенных в данный момент времени горелок. При нагреве момент достижения требуемой для выдержки температуры считается моментом перехода на выдержку и от него отсчитывается ее длительность. Таким образом, система наиболее точно реализует процесс выдержки, поскольку именно он является принципиальным при термообработке металла. После осуществления комплекса монтажных и пуско-наладочных работ были проведены эксплуата-

ционные испытания печи с целью проверки на соответствие следующим весьма жестким требованиям:

- максимальное отклонение температуры в печи от задания не должно 5 °С;
- регулирование при переходе с нагрева на выдержку должно проходить с минимумом переходных процессов;
- должно поддерживаться положительное относительное давление в печи.

В ходе эксплуатационных испытаний была выполнена термообработка 60 садок. При этом температурные показатели контролировались на двух участках программы нагрева:

Переход от первого нагрева к выдержке через 3 ч от начала выполнения программы.

Наиболее продолжительная выдержка (5 ч) через 11,5 ч после начала выполнения программы.

Типичные графики температур обоих участков представлены на рис. 18.159. Загрузка садки в печь происходит в момент времени программы 00:00. Участок *a* характеризует работу печи в начальный период времени (в соответствии с программой через 3 часа после начала нагрева должен произойти переход от периода нагрева к первоначальной промежуточной выдержке при температуре 780 °С). Участок *б* иллюстрирует работу печи во время основной пятичасовой выдержки садки при температуре 810 °С.

Результаты эксплуатационных испытаний представлены в табл. 18.32.

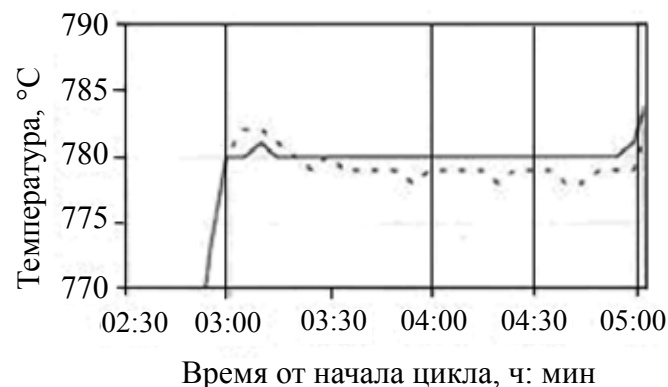
На рис. 18.160 представлен типичный график относительного давления в печи после модернизации.

Таблица 18.32

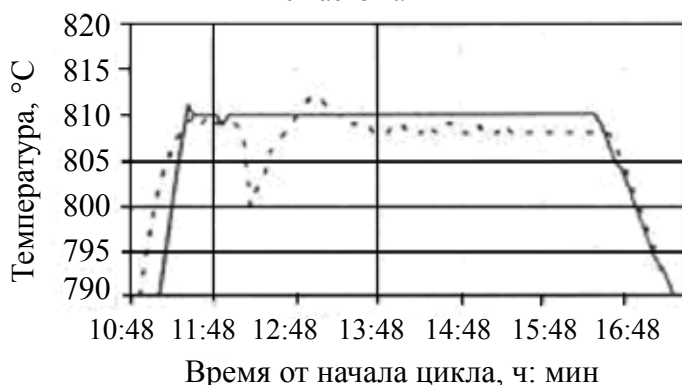
Результаты эксплуатационных испытаний по регулированию температуры печи

Показатель	Локальные регуляторы и МРТ 700		Микроконтроллер	
	(<i>a</i>)	(<i>б</i>)	(<i>a</i>)	(<i>б</i>)
Максимальное отклонение температуры от задания, °С	2	10	1	2

Таким образом, после модернизации системы импульсного отопления были получены следующие результаты: система импульсного отопления после модернизации обеспечивает однородное поле температур в рабочем пространстве печи в режиме выдержки с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$; автоматизированная система стабилизации давления обеспечивает поддержание давления в рабочем пространстве печи в режиме выдержки в диапазоне от -5 до 20 Па (-0,5–2,0 мм вод. ст.).



Участок а



Участок б

Рис. 18.159. Графики температур в печи на двух контролируемых участках.

Сплошная кривая - управление проводится микроконтроллером.

Пунктирная кривая – управление проводится локальными регуляторами и блоком МРТ (до модернизации)

Кроме непосредственно автоматизации печного нагрева, была создана система мониторинга и управления процессом на базе SCADA-системы Windows Control Center v4.02 фирмы SIEMENS для персонального компьютера, жестко связанная с ПЛК. Особенностью системы мониторинга и управления является то, что ПК с установленной SCADA-системой получает данные от контроллера в режиме «реального времени» и сохраняет их на жестком диске для последующей обработки.



Рис. 18.160. Относительное давление в печи в период нагрева садки
(1 мм вод. ст. = 10 Па)

Особенности параметров модуляции при управлении тепловой нагрузкой

Как отмечалось, под импульсным отоплением термических и нагревательных печей понимается отопление, определяемое режимом включения на полную мощность и полного отключения горелок на определенные промежутки времени. Для регулирования печей с импульсным отоплением используются в основном две системы автоматического управления:

- 1) система, базирующаяся на управлении клапаном-отсекателем, установленным на зону или группу горелок;
- 2) система управления каждой горелкой.

При работе зонального клапана-отсекателя все горелки зоны включаются и выключаются одновременно, схема же управления каждой горелкой характеризуется включением горелок не одновременно, а последовательно, друг за другом. Система управления каждой горелкой имеет ряд преимуществ перед системой с зональным клапаном-отсекателем, но более сложна в настройке и управлении,

поскольку на импульсный элемент системы накладываются дополнительные требования.

Требуемая тепловая нагрузка для поддержания заданной температуры определяется соотношением времени подачи и временем отключения топлива в печь, а один из параметров последовательности импульсов – период или длительность импульса является настроечным в системе автоматического регулирования. В редких случаях настроечными являются оба параметра. Таким образом, управление тепловой нагрузкой может осуществляться изменением длительности импульсов при постоянном периоде в случае широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменением частоты следования импульсов постоянной длительности при частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и одновременным изменением длительности и периода следования импульсов в случае комбинированной частотно-широтно-импульсной модуляции (ЧШИМ).

Особенности использования различных видов модуляции температуры печей с импульсным отоплением связаны с глубоким изменением тепловой нагрузки в ходе термообработки и соответствующим изменением амплитуды колебаний температуры в печи. Кроме того, знание характера изменения амплитуды колебаний температуры позволяет оценить количество включений регулирующих органов в цикле термообработки, т. е. требуемый ресурс этих органов.

Объект регулирования можно описать как статическое инерционное звено первого порядка. Тогда характер изменения амплитуды колебаний температуры при различных видах модуляции можно было проследить, используя следующее соотношение:

$$\Delta t = \frac{K_0}{1 - e^{-T/T_0}} \left(e^{\frac{-qT}{T_0}} - 1 \right) \left(e^{\frac{(q-1)'}{T_0}} - 1 \right) \quad (18.329)$$

или при $T < T_0$ с ошибкой не более 2 % при замене $e^x = 1 + x$

$$\Delta t = \frac{Tq(1-q)}{T_0} K_0, \quad (18.330)$$

где Δt – удвоенная амплитуда колебаний температуры; K_0 , T_0 – параметры объекта регулирования; T – период следования импульсов;

$q = \frac{\tau_{\text{им}}}{T_0}$ – коэффициент заполнения; $\tau_{\text{им}}$ – длительность импульса.

В случае ШИМ при изменении тепловой нагрузки печи в диапазоне 0–100 % амплитуда колебания температуры изменяется по парабо-

лической зависимости, причем максимальная величина удвоенной амплитуды при $q = 0,5$ равна

$$\Delta t_{\text{ШИМ}}^{\text{max}} = 0,25 T \frac{K_0}{T_0} = 0,5 \tau_{\text{им}} \frac{K_0}{T_0}. \quad (18.331)$$

При фиксированной длительности импульсов а случае ЧИМ зависимость амплитуды колебаний температуры тепловой нагрузки линейная, максимум удвоенной амплитуды колебаний наблюдается при $T \rightarrow \infty$ ($q \rightarrow 0$) и равен

$$\Delta t_{\text{ЧИМ}}^{\text{max}} = \tau_{\text{им}} \frac{K_0}{T_0}. \quad (18.332)$$

т. е. вдвое больший, чем при ШИМ.

В случае комбинированной модуляции ЧШИМ изменение длительности импульсов и периода может происходить по более сложным законам, чем при ШИМ и ЧИМ и определяется законом изменения величины $\tau_{\text{им}}$ и T . Например, при $\tau_{\text{им}} = \frac{C}{1-q}$ и $T = \frac{C}{q-q^2}$ (C – комплекс постоянных настроечных величин), величина Δt может быть выражена следующим образом:

$$\Delta t = C \frac{K_0}{T} = \text{const}. \quad (18.333)$$

По полученным характеристикам изменения амплитуды колебаний можно было сделать вывод, что по количеству включений двухпозиционного регулирующего органа с различными видами модуляции при выполнении одних и тех же режимов термообработки будет различно. Сравнительную оценку количества включений можно провести, используя зависимости периода от коэффициента заполнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{ШИМ}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} T_0}{K_0 \cdot 0,25}; \\ T_{\text{ЧИМ}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} T_0}{K_0 \cdot q}; \\ T_{\text{ЧШИМ}} = \frac{\Delta t_{\text{max}} T_0}{K_0 \cdot q(1-\dot{y})}, \end{array} \right.$$

где величина $\dot{y} = 0,75$ и 0 , для ШИМ и ЧИМ, соответственно.

Таким образом, выбор способа автоматического регулирования печи с импульсной системой отопления может определяться многими факторами, среди которых: особенности режимов нагрева, диапазон изменения тепловой нагрузки, конструкция и тепловая схема печи, условия работы горелочных устройств, возможности регулирующих органов и т. д. При выборе вида импульсной модуляции как составной части системы автоматического регулирования было необходимо учесть, что ЧШИМ является предпочтительной по обеспечению наибольшего диапазона тепловой нагрузки, но хуже других по управлению включением горелок. ЧИМ приемлема для обеспечения наибольшего диапазона тепловой нагрузки, но ограничена по управлению включением горелок. ШИМ предоставляет большую свободу в управлении включением горелок, но не лучшая по количеству включений и располагаемому диапазону изменения тепловой нагрузки.

Совершенствование тепловых и конструктивных параметров с использованием математического моделирования

Как отмечалось, характерным примером реализации современных технологий термообработки металла является конструкция камерной термической печи с импульсной системой отопления. Применение принципа импульсной подачи теплоносителя, использование малоинерционной футеровки и современных средств автоматизированного управления позволяет добиваться значительной экономии топлива и реализовывать режимы термической обработки ранее не доступные для печей такого типа.

Однако совершенствование функционирования автоматизированных режимов термообработки потребовало дополнительного анализа важнейших факторов, влияющих на теплотехнические и технологические параметры, особенно для такой ответственной марки стали как шарикоподшипниковая ШХ-15* [18.251-18.255].

При этом предъявляются жесткие требования к качеству термообработанного металла: металл после отжига должен иметь оди-

* Сурганов К.А. Моделирование процессов теплообмена для условий термообработки пакета труб в печи с импульсной системой отопления при конструировании и наладке тепловых режимов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / К.А. Сурганов. – Екатеринбург, 2006. – 24 с.

наковую структуру и свойства, а это обуславливает требование к максимально возможной равномерности его нагрева по всем измерениям. В садочных печах, где изделия расположены в несколько рядов, добиться равномерности достаточно сложно даже в условиях современной конструкции печи. Массивные многослойные загрузки металла приводят к значительной неоднородности структуры после термообработки в связи с тепловой инерционностью садки. С другой стороны, уменьшение массы термообрабатываемого металла приводит к недопустимому снижению производительности печи. В связи с этим актуальным становилось выявление формы и размеров садки, обеспечивающих оптимальную производительность термической печи с сохранением требуемого качества термообработки, а так же оптимизация режимов термообработки для условий массивных садок.

Получение решения этой задачи чисто эмпирическими методами нецелесообразно в связи с большим объемом исследований и, как следствие, значительными затратами на проведение натурных экспериментов. Поэтому важнейшим инструментом анализа тепловой работы энерготехнологических агрегатов становится математическое моделирование.

При выявлении формы и размеров садки, обеспечивающих оптимальную производительность термической печи с сохранением требуемого качества термообработки, а так же при оптимизации режимов термообработки для условий массивной садки требуется значительный объем вычислительных экспериментов, связанных с перебором рациональных вариантов. В этом случае необходимо, чтобы математическая модель, используемая при исследовании, реализовывала сравнительно небольшое число входных параметров, но, тем не менее, позволяла получить качественно-правильное описание процесса.

Для изготовления тел качения и подшипниковых колец широко используют высокоуглеродистую хромистую сталь ШХ15, обладающую высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением контактной усталости. Горячекатаные трубы из стали ШХ15 после соответствующей термической обработки (отжига) используются для вытачивания подшипниковых колец, которые подвергаются закалке и последующему отпуску. Таким образом, термообработка

труб проводится для снижения твердости стали ШХ15 до значений, обеспечивающих успешную обработку резанием, снятия внутренних напряжений и подготовки структуры к последующей закалке. А так как структура стали после отжига оказывает большое влияние на выбор режимов при закалке, то разница в структуре между отожженными трубами садки должна быть незначительной, что достигается принятым режимом отжига и точностью отработки этого режима.

Для отжига стали ШХ15 применяют печи садочного типа с переменной во времени температурой (печи с выкатным подом, с внешней механизацией) и разного рода проходные печи. В проходных термических печах (печи с роликовым и шагающим подом, печи с цепным конвейером), в которых металл нагревается поштучно или в один слой, соблюсти требования режима термообработки достаточно легко. В садочных печах, где металл прогревается садками, т. е. многоштучно, в несколько слоев, добиться соответствия требованиям режима отжига гораздо сложнее. Вместе с тем, достоинства садочных печей заключаются в простоте их конструкции и универсальности. Большим преимуществом является возможность создавать в них самые разнообразные температурно-временные условия, выполнять самые разнообразные операции термической обработки металла. Они незаменимы, когда необходимо осуществлять длительные технологические выдержки металла, обусловленные требованиями режима отжига.

Для стали ШХ15 существует несколько различных режимов термообработки, из которых для печей садочного типа до недавнего времени применялся только один одноступенчатый отжиг. При проведении любого режима термообработки стремятся получить структуру равномерного зернистого перлита, которая является наиболее благоприятной как с точки зрения обрабатываемости, так и для качественного проведения закалки. В соответствии с механизмом образования структуры зернистого перлита, одноступенчатый отжиг включает в себя стадии нагрева до заданной температуры, выдержки при этой температуре и охлаждения с определенной скоростью. Данный тип отжига является наиболее просто реализуемым и повсеместно используется в камерных печах. Одноступенчатый отжиг дает хорошее качество при термообработке нормальных заготовок с исходной структурой пластинчатого перлита, однако в

практике производства структура стали перед отжигом, как правило, неоднородна, – имеет место крупнопластинчатый перлит, зачастую с остатками карбидной сетки. В этом случае хорошие результаты дает применение двухступенчатого режима отжига, который отличается несколько более высокой температурой нагрева первой ступени, быстрым охлаждением, при котором происходит образование новых центров кристаллизации, и низкой температурой нагрева второй ступени.

До недавнего времени особенности двухступенчатого режима отжига позволяли реализовывать его только для проходных печей. Вместе с тем, необходимость осуществления технологических выдержек, а также длительное медленное охлаждение на последнем этапе существенно усложняли конструкцию проходных печей и практически сводили на нет все преимущества данного типа отжига. Появление камерных термических печей с малоинерционной футеровкой, высокоскоростными горелками, работающими в импульсном режиме и обеспечивающими равномерное температурное поле, развитых средств автоматизации позволяет в настоящее время использовать двухступенчатый отжиг для термической обработки труб ШХ15, а значит, обеспечивать их высокое качество. Однако, требовались дополнительные исследования нагрева массивных садов в камерных термических печах новой конструкции, поскольку режим двухступенчатого отжига предполагает достаточно точное регулирование нагрева всей массы садки по сравнению с одноступенчатой термообработкой.

Как отмечалось, так как производственные эксперименты требуют значительных затрат, связанных с большим объемом подготовительных работ и дороговизной натурных экспериментов, актуальной является разработка методов математического описания тепловых процессов, происходящих в печи, с учетом геометрических параметров участвующих в теплообмене тел и теплофизических характеристик их материалов.

В настоящее время при моделировании энерготехнологических агрегатов весьма перспективными являются методики, позволяющие стыковать решения уравнений конечно-разностным методом в рамках крупной сетки (в зональной постановке) для учета процессов радиационного переноса и в рамках мелкой сетки (узлов) для

учета процессов конвективного переноса и газодинамики. Ярким представителем данной группы является динамический зонально-узловой метод [18.1].

В данной работе актуальным было построение математической модели, которая позволила очень оперативно, используя небольшое число входных параметров, описывать процесс теплообмена в печи и, в частности, в трубной садке, и таким образом была бы пригодна для эффективного выявления рациональной укладки, а также оптимизации режимов термической обработки.

Таким образом, требовалось построение быстродействующей математической модели теплообмена внутри трубного пакета при термообработке садки труб в печи с импульсной системой отопления в условиях, когда определены только основные конструкторские решения по модернизации печи [18.3].

Согласно регламенту работы перед термообработкой проводят предварительное формирование садки, для чего прокат собирают в пакеты с помощью специальных скоб-бугелей, изготовленных из чугуна или жароупорной стали. Садка формируется по возможности из труб одной плавки и одинакового размера. Между рядами труб укладываются прокладки высотой 40–50 мм.

При модернизации было предусмотрено оснащение печи футеровкой из керамоволокнистых теплоизоляционных материалов, а также импульсной системой отопления под управлением современной трехуровневой АСУ ТП. Данные решения и позволили использовать в модернизируемой печи двухступенчатый график термообработки труб в садке.

Согласно многим расчетным и практическим исследованиям, для печей с импульсной подачей теплоносителя характерна высокая равномерность температурных полей печного пространства. По этой причине температурное поле в рабочем пространстве печи в рамках данной концепции принято однородным. Рабочее пространство камерной печи состоит из ряда повторяющихся секций, включающих по одной горелке слева и справа. На основании исследований, проведенных на печи старой конструкции, принимается, что условия термообработки трубных заготовок в каждой из таких

секций принципиально одинаковы, поэтому вполне достаточно изучить закономерности температурного режима термообработки в одной из них. Таким образом, была принята двумерная модель пакета трубных заготовок. Перенос тепла вдоль пакета за счет теплопроводности не учитывался, так как он незначителен по сравнению с переносом тепла в поперечном сечении садки при условии реализации равномерно-распределенного режима теплообмена в печи.

Садка рассматривалась как квазиоднородное тело с эквивалентными теплофизическими свойствами. Было принято, что трубы в ряду равномерно расположены по всей длине садки, имеют одинаковый диаметр и толщину стенки. Расстояние между рядами, определяемое в исходной садке толщиной (диаметром) прокладок, принято одинаковым, влияние прокладок на процесс теплопереноса не учитывается. Подвод теплоты к поверхности садки осуществляется за счет теплообмена излучением и конвекцией с поверхностью садки (внешних рядов труб). Эти тепловые потоки являются граничными условиями для квазиоднородного тела, и, в связи с однородностью температурного поля в рабочем пространстве печи, одинаковы на всех гранях садки. Геометрическая модель садки показана на рис. 18.161.

С использованием вышеприведенных допущений, нагрев пакета трубных заготовок в термических печах может быть описан двумерным уравнением теплопроводности, которое с учетом симметричности задачи было представлено в следующем виде:

$$\rho_{\text{эф}} c_p(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial x} \left(\lambda_{\text{эф}}^x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(\lambda_{\text{эф}}^y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (18.335)$$

$$\begin{cases} T|_{r=0} = T_0, \\ \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (\tau > 0), \\ \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (\tau > 0), \end{cases} \quad (18.336)$$

$$\begin{cases} -\lambda_{\text{эф}}^x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} = q_{\text{в}} \quad (\tau > 0), \\ -\lambda_{\text{эф}}^y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=h} = q_{\text{в}} \quad (\tau > 0), \end{cases} \quad (18.337)$$

где T_0 – начальная температура эквивалентного тела; c_p – теплоемкость эквивалентного тела, Дж/(кг·К); $\lambda_{\text{эф}}^x(T)$, $\lambda_{\text{эф}}^y(T)$ – эффективные теплопроводности эквивалентного тела в горизонтальном и вертикальном направлениях, Вт/(м·К); l , h – размеры тела в горизонтальном и вертикальном направлении соответственно с учетом симметричности задачи, м; $q_{\text{в}}$ – плотность теплового потока на границе эквивалентного тела, Вт/м²; $\rho_{\text{эф}}$ – плотность эквивалентного тела (кг/м³), которая, учитывая равенство расстояний между трубами в ряду и между рядами в геометрической модели, рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{эф}} = \frac{\pi(d - \delta)\delta}{S_x \cdot S_y} \rho. \quad (18.338)$$

Здесь d – диаметр трубы, м; δ – толщина стенки трубы, м; S_x – расстояние между центрами труб в ряду, м; S_y – расстояние между центрами рядов в садке, м; ρ – плотность стали ШХ15, кг/м³.

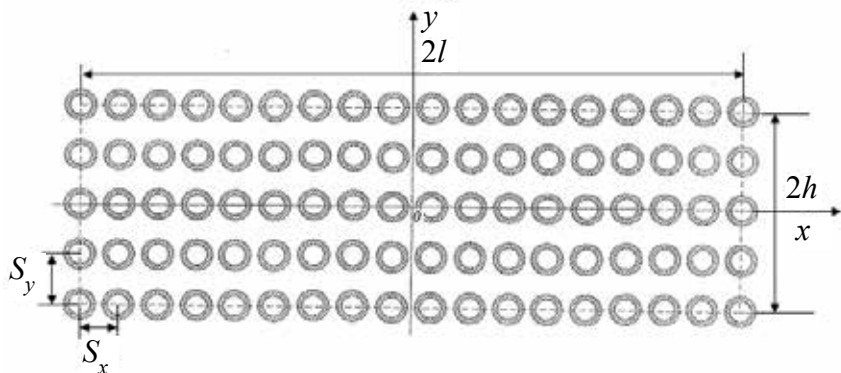


Рис. 18.161. Геометрическая модель трубной садки

Теплофизические свойства ШХ15 принимались по данным исследований кафедры физики УГТУ-УПИ (УрФУ), проведенных для

ПНТЗ. Согласно этим данным, в диапазоне температур 740–760 °С наблюдается резкое изменение свойств стали ШХ15. Это можно объяснить фазовым превращением (A_{c1}), заключающимся во взаимодействии некоторого количества феррита и цементита друг с другом с образованием аустенита, а также увеличением растворения цементита в аустените, которое, вследствие значительного теплового эффекта данного превращения, оказывает большое влияние на процесс термообработки. При охлаждении садки происходит процесс распада аустенита, сопровождающийся ростом ферритных полей и выделением из аустенита карбидных включений. Учитывая массивность обрабатываемых в камерных печах садок и считая в этом случае, что тепловой эффект фазовых превращений при относительно медленном нагреве равен тепловому эффекту при относительно медленном охлаждении, тепловой эффект при охлаждении учитывался смещением «всплеска» теплофизических свойств, моделирующих тепловые эффекты при нагреве. Величина температурного смещения определялась из термокинетических диаграмм для стали ШХ15, а также из исследований, проведенных на печах старой конструкции, и натурных экспериментов на модернизированной печи. Хотя в общем случае тепловые эффекты при нагреве и охлаждении не одинаковы, тем не менее, учитывая многолетний опыт ПНТЗ по реализации одноступенчатого режима термообработки для стали ШХ15, оказалось возможным применить данное упрощение.

При моделировании термообработки садки любых изделий наибольшую трудность представляет учет анизотропии распространения теплоты. При выборе конкретного метода моделирования учитывались результаты предварительного ДЗУ-моделирования [18.1], согласно которым, в межтрубном пространстве конвективные потоки малы, и тепло внутри садки передается в основном переизлучением с трубы на трубу.

Для описания процесса теплопередачи внутри трубного пакета использована модель эффективной теплопроводности. За основу была принята методика расчета радиационного теплообмена в слое волокнистого материала зональным методом [18.1]. В данной методике рассматривается пучок стержней коридорного типа, ограниченного с одной стороны плоским нагревателем, с другой – холодильником. Стержни расположены равномерно между нагревателем и

холодильником с постоянными шагами по горизонтали и вертикали. Теплообмен между стержнями происходит путем излучения, внутри стержней – путем теплопроводности. Связь между поглощенным, отраженным и падающим на стержень излучениями определялась на основе представления о геометрических угловых коэффициентах. При этом считалось, что отражение от поверхности стержня подчиняется закону Ламберта, а направления падающего и дифрагированного излучения совпадают. Таким образом, методика справедлива для слоя волокон большого диаметра, когда рассеяние определяется в основном, процессом отражения, и может быть применена для условий садки трубных заготовок.

В модели для трубной садки стержни были заменены на цилиндрические заготовки. Учитывая, что тепловой поток распространяется по садке анизотропно в горизонтальном и вертикальном направлении, были получены следующие соотношения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\text{эф}}^x = \lambda_{\text{рад}}^x \left(C_y - \frac{1}{1 + 2\lambda_{\text{рад}}^*} \right); \\ \lambda_{\text{рад}}^x = \lambda_{\text{рад}}^* \frac{S_x}{S_y}; \\ C_y = \left(1,42 \frac{S_y}{d} - 0,42 + 1,18(1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{S_y}{d} - 1} \right); \end{array} \right. \quad (18.339)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\text{эф}}^y = \lambda_{\text{рад}}^y \left(C_x - \frac{1}{1 + 2\lambda_{\text{рад}}^*} \right); \\ \lambda_{\text{рад}}^y = \lambda_{\text{рад}}^* \frac{S_y}{S_x}; \\ C_x = \left(1,42 \frac{S_x}{d} - 0,42 + 1,18(1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{S_x}{d} - 1} \right); \end{array} \right. \quad (18.340)$$

$$\lambda_{\text{рад}}^* = 4\sigma_0 d \frac{\varepsilon}{1,42 - 0,42\varepsilon} T^3. \quad (18.341)$$

Здесь ε – степень черноты труб в садке; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; T – температура некоторой точки садки как квазиродного тела.

Используя вышеприведенные методы для описания процесса теплопередачи внутри пакета труб, фактически перешли к решению задачи теплопроводности в двумерном теле. Для численного решения выполнено преобразование исходной дифференциальной задачи методом контрольного объема. Полученный дискретный аналог решался с помощью локально-одномерного метода с использованием чисто неявной схемы расчета.

С использованием разработанной модели проведен анализ тепловой инерционности садки и выявлялось рациональная укладка труб в пакете.

Основным требованием при термообработке является создание однородных температурных условий по всей садке в областях превращения перлита в аустенит (технологических выдержках), а также на этапе контролируемого охлаждения при сфероидизации карбидов. Другими словами, скорости нагрева и охлаждения при термообработке определяются не мощностными характеристиками печи, а, прежде всего, тепловой инерционностью массивного трубного пакета, которая, в свою очередь, зависит от геометрических размеров пакета и способа укладки труб в садку. Под тепловой инерционностью здесь понимается время достижения центром пакета некой контрольной температуры.

В этом случае, целесообразно было рассмотреть идеальную термическую печь, в которой температура внутрипечного пространства на этапах, зависящих от тепловой инерционности садки, меняется мгновенно в соответствии с режимом термообработки. Данное упрощение позволило всесторонне исследовать тепловую инерционность садки, качественно определить производительность печи и на основании этих данных допроектно выбрать оптимальную конфигурацию трубного пакета.

Как уже было отмечено выше, технология сборки пакета на ПНТЗ предполагает размещение садки в печи на бугелях, между рядами труб укладываются прокладки. В связи с унификацией способа загрузки садки, а также с невозможностью изменения типа прокладок, в работе рассматривалась задача рациональной укладки при

изменении рядности пакета и расстояний между трубами в ряду. В этом случае достаточно рассмотреть одномерную задачу теплопроводности в эквивалентном теле с распространением теплового потока только в вертикальном направлении.

Термообработка ШХ15 проводится при основных температурах 600–840 °С. В этом случае, при условии равномерно-распределенного режима теплообмена в печи, определяющее влияние на теплообмен оказывает излучение. Данный факт для печей с импульсной системой отопления подтверждается предварительным ДЗУ-моделированием [18.1]. Исходя из этого, для выявления рациональной укладки на внешней поверхности эквивалентного тела задавали граничные условия третьего рода по излучению.

Для предварительного анализа тепловой инерционности представили исходное дифференциальное уравнение теплопроводности в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} = \Theta^{3/4} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \tilde{y}^2} \quad (18.342)$$

$$\Theta|_{Fo=0} = \Theta_0 = \left(\frac{T^0}{T_n} \right)^4; \quad (18.343)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{y}} \right|_{\tilde{y}=0} = 0 \quad (Fo > 0); \quad (18.344)$$

$$\left. \frac{b}{4\epsilon h} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial \tilde{y}} \right|_{\tilde{y}=h} = (1 - \Theta). \quad (18.345)$$

Здесь Θ – безразмерная относительная температура; \tilde{y} – безразмерная координата; T^0 – начальная температура внутритрубного пространства (печи) на отдельном этапе термообработки К; T_n – конечная температура печи, К; b – геометрический параметр трубного ряда, слабо зависящий от температуры и определяющий порозность садьки, м:

$$b = 4d \frac{\varepsilon}{1,42 - 0,42\varepsilon} \cdot \frac{S_y}{S_x} \left(C_x - \frac{1}{1 + 2\lambda / \lambda_{\text{рад}}^*} \right). \quad (18.346)$$

Таким образом, было получено, что тепловая инерционность пакета зависит от безразмерного параметра b/h . Далее изучалось влияние нормированных значений порозности b и толщины пакета h на тепловую инерционность при варьировании данных параметров в пределах, заданных размерами бугелей, принятых на ПНТЗ. Исследовалась зависимость температуры от времени на поверхности и в центре пакета. По результатам исследования получены следующие выводы.

Изменение порозности пакета при прочих равных условиях оказывает большее влияние на его тепловую инерционность, чем изменение рядности в области плотной укладки. Зависимость времени достижения контрольной температуры от плотности трубного пакета можно описать плохо формализованной логарифмической (показательной) функцией.

Изменение толщины пакета h влияет на тепловую инерционность менее экстремально, зависимость времени τ достижения контрольной температуры от толщины пакета хорошо описывалось степенной функцией следующего вида:

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^a, \quad (18.347)$$

где τ_0 – время достижения контрольной температуры при высоте садки h_0 , зависящее от температуры нагрева, начальной температуры пакета, его теплопроводности и теплоемкости, a – степень, зависящая от плотности (порозности) пакета и принимающая значения 1,2–1,4 для рассматриваемых условий.

После проведения предварительного анализа был выполнен комплекс работ по выявлению рациональной укладки садки. В частности исследовался вопрос производительности идеальной печи при изменении толщины пакета и расстояния между трубами в ряду. С учетом одномерности рассматриваемой при оптимизации модели, выражение для производительности печи записывалось следующим образом:

$$P_{\Pi} = \frac{H\rho_{\text{эф}}}{\tau_{\text{ТО}}}. \quad (18.348)$$

Здесь $\tau_{\text{ТО}}$ – общее время термообработки, зависящее от тепловой инерционности садки, ч; H – высота садки, м.

На рис. 18.162 представлен двухступенчатый график термообработки стали ШХ15, применяемый для роликовых печей.

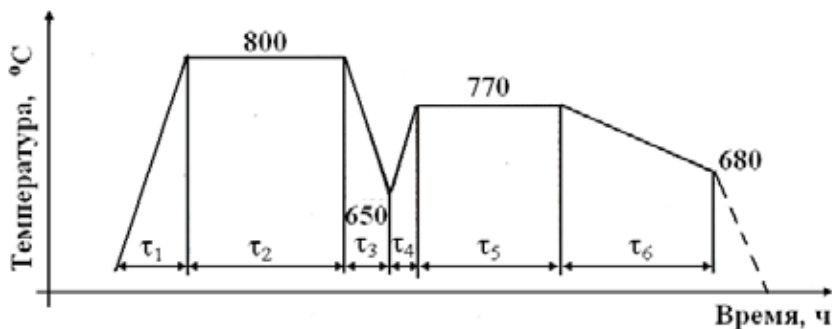


Рис. 18.162. Двухступенчатый график термообработки для роликовых печей

Как видно из рис. 18.162, общее время термообработки $\tau_{\text{ТО}}$ можно представить аддитивной функцией вида

$$\tau_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^6 \tau_i. \quad (18.349)$$

Был проанализирован каждый этап термообработки с учетом термической массивности термообрабатываемой садки.

Скорость нагрева на этапе τ_1 , режимом термообработки не регламентируется. Однако при необходимости получения равномерной структуры всей отжигаемой массы металла, скорость должна быть достаточно низкой, чтобы обеспечить достижение температуры 770–780 °C всей массой садки по возможности одновременно. На этапе τ_1 , происходит фазовое превращение A_{c1} , тепловой эффект которого зависит от массы садки. Вычислительными экспериментами установлено, что длительность нагрева оказывает положительное влияние на согласованность температур внутри пакета вне зоны

фазовых превращений. Внутри данной зоны длительность нагрева практически не влияет на равномерность температурных полей садки. В связи с вышеизложенным, предлагалось разделить этап τ , на дополнительные этапы: нагрев до температуры фазовых превращений; выдержка при этой температуре для выравнивания температур в пакете; нагрев до температуры растворения крупных карбидов. За температуру растворения крупных карбидов принята температура 820 °С. При выборе учитывалась декларируемая точность нагрева и литературные данные по термообработке стали ШХ15.

Продолжительность технологических выдержек τ_2 и τ_5 зависит от величины температуры нагрева, от структуры стали до отжига, от ее химического состава. С целью наиболее полного исследования производительности печи варьировали времена технологических выдержек от 0,5 до 2 ч для выдержки τ_2 , от 1 ч до 5 ч для τ_5 .

Согласно режиму термообработки длительность быстрого охлаждения τ_3 и быстрого нагрева τ_4 не регламентируется. В этом случае на данные временные этапы влияет исключительно тепловая инерционность пакета. Учитывая многолетний опыт по реализации ПНТЗ одноступенчатого графика нагрева, было принято, что достаточно охладить центр садки, определяющий тепловую инерционность пакета, до температур 710–720 °С при температуре поверхности 650 °С.

Этап охлаждения τ_6 является в процессе отжига наиболее сложным и неопределенным при термообработке массивных садок. Исходя из требований отжига, на этом этапе необходимо проводить медленное согласованное охлаждение всей массы садки. Однако фазовое превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ на практике создает значительное препятствие для равномерного охлаждения. Величину максимального отклонения температур пакета от траектории охлаждения (температуры печного пространства) задавали по исследованиям ЦЗЛ ПНТЗ. Большое значение имеет скорость охлаждения. На практике применяют охлаждение до 670–680 °С, длящегося не менее 5 ч. При увеличении массы садки время охлаждения приходится увеличивать в связи с необходимостью согласованного достижения нижней температуры охлаждения всей садкой.

Окончательный график, используемый для выявления рациональной укладки, представлен на рис. 18.163.

В связи с вышеизложенным, общая задача рациональной укладки могла быть формально записана следующим образом:

$$P_{\Pi} = \frac{H\rho_{\text{эф}}}{\tau_{\text{ТО}}(S_x, H)} \rightarrow \max, \quad (18.350)$$

где величина $\tau_{\text{ТО}}(S_x, H)$ с учетом анализа графика записывается следующим образом:

$$\tau_{\text{ТО}} = \sum_{i=1}^4 \tau_i(S_x, H) + \sum_{j=1}^2 \tau_j + f(S_x, H); \quad (18.351)$$

$$f(S_x, H) = \begin{cases} \tau_{\text{ox min}}, t_7(S_x, H) \leq \tau_{\text{ox min}} \\ \tau_7(S_x, H), \tau_7(S_x, H) > \tau_{\text{ox min}} \end{cases}. \quad (18.352)$$

При ограничениях:

$$\begin{aligned} |t_{\Pi} - t_{\Pi}| - \Delta t_{\max} &\leq 0, \tau \in \tau_7; \\ H - H_{\max} &\leq 0; \\ S_v - L &\leq 0. \end{aligned} \quad (18.353)$$

Здесь $\tau_{\text{ox min}}$ – минимальное время контролируемого охлаждения на последнем этапе термообработки, t_{Π} , t_{Π} – температуры соответственно центра пакета и печного пространства на этане контролируемого охлаждения τ_7 , Δt_{\max} – максимальный температурный перепад между центром пакета и печного пространства, H_{\max} – максимальная высота пакета, $L = 2l$ – ширина пакета.

Таким образом, можно было утверждать, что задача рациональной укладки трубного пакета и увеличения производительности печи относится к классу задач условной нелинейной дискретной оптимизации с ограничениями типа неравенств. Решение задач дискретной оптимизации связано с трудностями принципиального характера. Из-за дискретности допустимого множества неприменимы многие приемы, разработанные в математическом программировании, например, движение по направлению градиента или антиградиента, переход из одной вершины многогранного множества допустимых точек в другую и т. д. Однако, используя результаты

предварительного исследования тепловой инерционности пакета, можно построить достаточно эффективный алгоритм оптимизации производительности печи и выявления рациональной укладки садки.

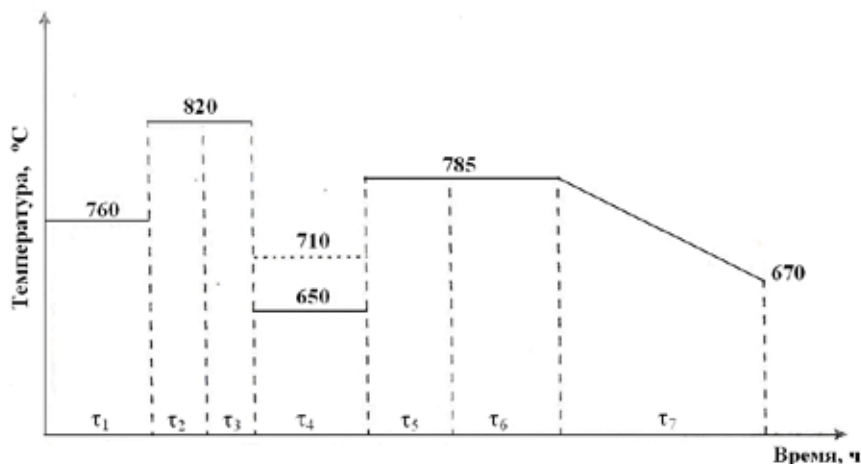


Рис. 18.163. График, используемый для выявления рациональной укладки

Алгоритм является модификацией метода покоординатного спуска, оптимизированным для условий задачи (18.350)–(18.353). Был определен локальный максимум при фиксируемом числе труб в ряду, которое определяется параметром S_x и при варьировании числа рядов, определяемое параметром H . В качестве начальной точки выбран вариант наиболее плотной укладки труб $S_x^0 = S_x^{\min}$, фактически определяемый внешним диаметром трубы d .

Для одномерной оптимизации рядности пакета на каждом k -ом шаге использовалась минимально возможная высота садки $H_{\min} = S_y$, которая выбирается из соображений сокращения вычислений при расчетах $\tau_{\text{то}}(S_x^k, H)$. Проводился численный расчет этапов термообработки $\tau_4(S_x^k, H)$ и $\tau_5(S_x^k, H)$, полностью определяемых тепловой инерционностью пакета при различных значениях H равномерно распределенных на интервале $S_y \leq H \leq H_{\max}$. При этом расчет величины $\tau_5(S_x^k, H)$ запускается с начальным распределением температур, полученным из расчета $\tau_4(S_x^k, H)$ при достижении температуры 710 °C; расчет $\tau_4(S_x^k, H)$ проводится полностью.

Из расчета данных этапов определялись показатели степени для выражения (18.347).

Проводился численный расчет всех этапов термообработки, полностью определяемых тепловой инерционностью пакета $\tau_i(S_x^k, H)$, откуда из выражения (18.347) рассчитано $\tau_i(S_x^k, H)$ для всех значений $H, S_y \leq H \leq H_{\max}$.

Выполнен расчет $f(S_x^k, H_m)$ по формуле (18.353) для всех значений $S_y \leq H \leq H_{\max}$, при которых соблюдается условие (18.353); фиксируется значение H_F^k , начиная с которого $f(S_x^k, H_F^k) = \tau_7(S_x^k, H_F^k)$, $H_{\Delta T}^k$ условие (18.353) не выполняется; вычисляется значение $H_I^k = \min(H_F^k, H_{\Delta T}^k)$. При соблюдении условия (18.353) вычисляется значение целевой функции $P_{\Pi}(S_x^k, H_m)$. При выполнении условия $P_{\Pi}(S_x^k, H_{m-1}) > P_{\Pi}(S_x^k, H_m)$ локальный минимум $P_{\Pi}^{\max}(S_x^k, H_m) > P_{\Pi}(S_x^k, H_{m-1})$ был найден.

При переходе к новому значению S_x^{k+1} , $S_x^k < S_x^{k+1} \leq L$ вновь выполняется весь вышеописанный комплекс действий. Вычисление функции $f(S_x^{k+1}, H_m)$ выполнялось только для $m \geq I$, затем значение I вновь фиксируется для нового $H_I^{k+1} = \min(H_F^{k+1}, H_{\Delta T}^{k+1})$.

Максимум целевой функции $P_{\Pi \max}(S_x^k, H_M)$ считался найденным при $P_{\Pi}^{\max}(S_x^k, H_M) > P_{\Pi}^{\max}(S_x^{k+1}, H_M^{k+1})$, $P_{\Pi \max}(S_x^k, H_M) = P_{\Pi}^{\max}(S_x^k, H_M)$.

Был выполнен расчет по данному алгоритму для условий камерной печи. Исходя из результатов расчетов, можно было сделать следующие выводы.

Уже из вида целевой функции (18.350) можно было сделать вывод, что зависимость между производительностью печи и тепловой инерционностью пакета есть обратная величина. Соответственно, на производительность печи в большей степени влияет изменение рядности пакета, чем изменение порозности. Полученные результаты исследований подтверждали это соображение.

Производительность печи возрастает по мере разрежения пакета, при этом локальный максимум смещается в сторону большей рядности. Значительную роль играют ограничения в задаче оптимизации, – по мере увеличения производительности и в зависимости от времен технологических выдержек τ_2 , τ_5 локальный максимум

оказывается недостигнут вследствие ограничений H_{\max} и степени рассогласования температур внутри пакета.

Значительную роль на степень рассогласования температурных полей пакета на этапе τ_7 оказывает его толщина. Изменение порозности, напротив, незначительно влияет на данное рассогласование. Данный факт объясняется малой эффективной теплопроводностью пакета при фазовом превращении, что в совокупности с малым тепловым потоком вблизи поверхности трубной садки определяет значительное влияние толщины пакета на степень рассогласованности температур.

Изменение длительностей технологических выдержек в заданных выше пределах незначительно влияет на величину общего экстремума целевой функции, при всех наложенных ограничениях. Таким образом, производительность печи качественно определяется в основном тепловой инерционностью пакета.

По результатам численных экспериментов был выбран вариант пятирядного пакета с 16–17 трубами в ряду, обеспечивающий оптимальную производительность печи при сохранении требуемого качества термообработки.

Созданная модель процесса теплообмена в рабочем пространстве печи позволила уточнить график термообработки и провести проверку адекватности модели путем сравнения расчетных и экспериментальных данных.

После выявления рациональной укладки были уже полностью определены конструктивные параметры модернизируемой камерной печи. Стены, свод и заслонка футерованы керамоволокнистыми теплоизоляционными материалами с малой инерционностью, под выложен шамотным кирпичом ШБ, вся нижняя часть выложена легковесным шамотным кирпичем ШЛБ-1.3. Под подом печи проектом предусмотрено размещение труб воздушного охлаждения.

Как отмечалось для реализации автоматизированного управления, печь была условно поделена на 3 зоны, температура в каждой зоне поддерживается локальным ПИД-регулятором. Для управления температурным режимом в каждой зоне используется по одной управляющей сводовой термопаре, дополнительный контроль реализуется с помощью четырех термопар, так же рассредоточенных по своду печи.

В печи предусматривается установка высокоскоростных горелок, способных работать в импульсном режиме. Работа горелок каждой зоны управления возможна в одном из трех независимых режимов, каждый из которых оптимизирован под свою конкретную задачу – быстрый нагрев, медленный нагрев или выдержка, охлаждение. Режимы работы по существу отличаются друг от друга коэффициентом избытка воздуха.

Разработка математической модели для детального расчета процесса термообработки садки труб проводилась в развитие сопряженной задачи теплообмена в зональной постановке. Учитывая принятые конструкторские решения, и принимая, что в камерной термической печи при условии импульсного отопления реализуется равномерно-распределенный режим внешнего теплообмена, разработана методика моделирования сопряженной задачи теплообмена с использованием трех зон: «газ-кладка-металл». Оправданность данного подхода для печей с импульсной подачей теплоносителя доказана многочисленными опытными данными и данными расчетов.

Условием построения адекватной модели процессов теплообмена агрегата является учет всех объектов, участвующих в этом теплообмене. Как уже говорилось выше, в связи с унификацией процесса загрузки/выгрузки трубной садки из печи необходимо применение бугелей, которые являются крупными потребителями тепла (рис. 18.164). Полная поверхность бугеля $F_{\text{буг}}$ состоит из поверхности, открытой для излучения $F_{\text{буг}}^P$ и поверхности, экранируемой садкой $F_{\text{буг.экp}}^P$. Соответственно, полная поверхность садки F_c состоит из поверхностей F_c^P и $F_{\text{сад.экp}}^P$. Тогда бугели, находящиеся в печи, и садку можно заменить эквивалентным телом с площадью лучевоспринимающей поверхности F_f^P :

$$F_f^P = F_c + n_{\text{буг}}(F_{\text{буг}} - 2F_{\text{буг.экp}}^P), \quad (18.354)$$

где $n_{\text{буг}}$ – число бугелей в печи.

В этом случае температура поверхности эквивалентного тела для зональной модели вычислялась следующим образом:

$$T_f = \frac{F_{\text{буг}}^P}{F_f^P} T_{\text{буг}}^4 + \frac{F_c^P}{F_f^P} T_c^4. \quad (18.355)$$

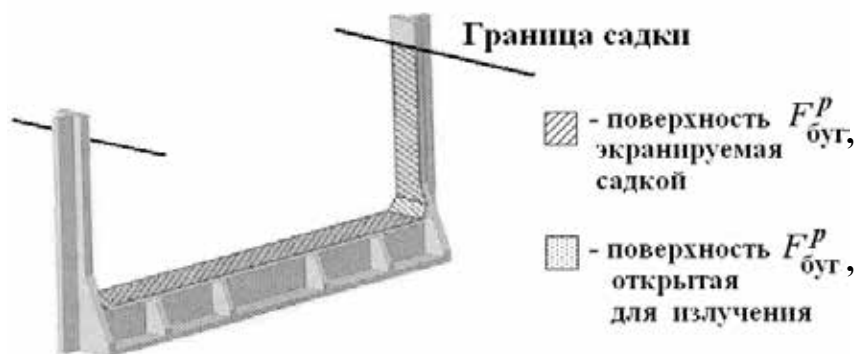


Рис. 18.164. Геометрия бугеля, принятая для расчетов при моделировании

Здесь $T_{\text{буг}}$ – температура поверхности тела, заменяющего набор бугелей (эквивалентный бугель), T_c – средняя по поверхности температура садки.

Непосредственно при расчетах бугель заменяется эквивалентной пластиной с учетом сохранения массы и площади лучевоспринимающей поверхности F_f^P .

При численной реализации расчета процесс тепломассообмена разбивался на отдельные этапы, в пределах каждого из которых он полагался квазистационарным. На каждом временном шаге проводился расчет тепловых потоков на поверхностях эквивалентного тела и кладки. Далее решались двумерная задача теплопроводности в садке труб, и одномерная – в эквивалентном бугеле. Кроме того, решалась одномерная задача теплопроводности в кладке, – отдельно в области, футерованной керамоволокнистой тепло-изоляцией, отдельно – в поду печи. Значения плотностей тепловых потоков, являющиеся граничными условиями для тел, участвующих в теплообмене, принимались из решения внешней задачи. При решении задачи теплопроводности в садке значения плотностей теплового потока на границе садки рассчитываются для каждого поверхностного узла отдельно, в приближении зонально-узлового метода [18.1].

Температурный режим термообработки задается по температуре внутренней поверхности кладки T_k , являющейся управляющим параметром. При этом предполагается, что $\bar{T}_n = T_k$, поскольку управ-

ление печью ведется по термопарам, расположенным на расстоянии около 100 мм от поверхности кладки.

Степени черноты продуктов сгорания вводились в модель в виде аппроксимирующих зависимостей. Для определения расходов газа и воздуха составлялся тепловой баланс печи. Непосредственно при моделировании учитывалось, что коэффициент избытка воздуха меняется в зависимости от этапа термообработки.

Для определения достоверности результатов расчетов, получаемых при помощи модели, было проведено их сравнение с экспериментально полученными данными, снятыми во время промышленных исследований модернизированной камерной печи.

Измерение температур в пакете проводилось с помощью 8 гибких хромель-алюмелевых термопреобразователей (ХА) с открытыми спаями, размещаемых в различных точках садки на одинаковом расстоянии от заднего торца пакета. Кроме температур, в пакете фиксировались данные по расходам газа и воздуха с помощью вихревых расходомеров для газа и для воздуха. Регистрация показаний термопар и расходомеров проводилась с помощью средств АСУ печи. Результаты натурных экспериментов передавались разработчикам с помощью созданной системы удаленного мониторинга проведения эксперимента (см. рис. 18.163), являющейся составной частью трехуровневой АСУ ТП. Применение системы удаленного мониторинга проведения эксперимента позволило сократить время обработки массива экспериментальных данных.

По результатам промышленных испытаний можно было отметить высокую равномерность полученных экспериментально температурных полей внутри рабочего пространства печи. Расхождение температурных полей на этапе быстрого охлаждения (максимальное расхождение около 20 °С) объясняется ухудшенным перемешиванием, возникающим как в связи с необходимостью подавать один лишь воздух для охлаждения, так и нарушением принципа импульсного отопления, связанным с требованием наискорейшего охлаждения садки на данном этапе.

По экспериментальным показаниям термопар, установленных в трубах по периметру пакета, можно было косвенно судить о равенстве тепловых потоков около различных граней садки, поскольку расхождение показаний по температуре составляло не более 3-6 °С.

Это, в свою очередь, позволяет сказать о возможности применения упрощенной зональной модели «газ-кладка-металл», в которой поверхность садки представлена лишь одной зоной. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных по температурным полям внутри садки можно было сделать вывод о применимости модели эффективной теплопроводности (ранее использовавшийся только для волокнистого материала) для условий трубного пакета (рис. 18.165).

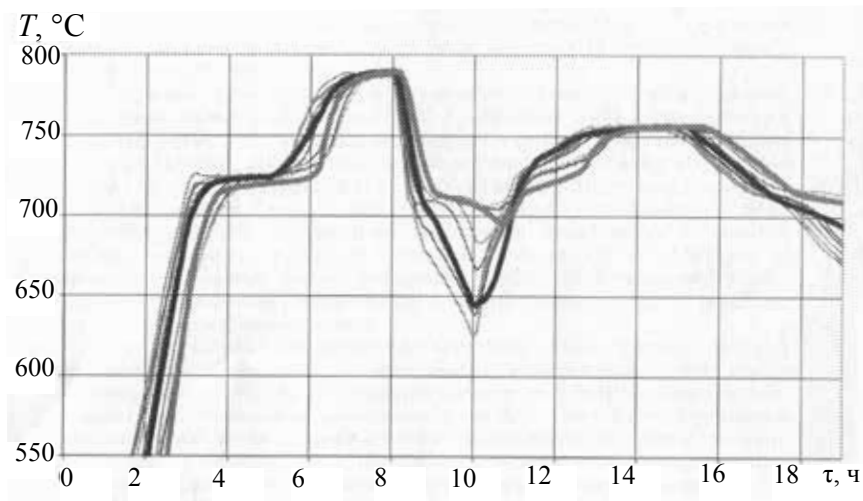


Рис. 18.165. Сопоставление расчетных и экспериментальных температурных кривых трубного пакета:

— — — — — поверхность (расчет); — — — — — центр (расчет);
 - - - - - экспериментальные данные

В целом, расхождение между экспериментальными данными, и данными, полученными в результате моделирования, не превышало 8 %, а в критических точках, таких как значения температур в пределах выдержек — не более 3 % (3–5 °C). Сопоставление расчетных и экспериментальных значений расходов газа и воздуха позволило сделать вывод о достоверности математической модели печи, поскольку расхождение не превышало 7 % за исключением расхождения по расходу газа на этапе контролируемого охлаждения. Расхождение расчетных и экспериментальных расходов газа на этапах охлаждения, достигающее 20 %, было обусловлено недостатками

конструкции расходомера, который, как оказалось, не был способен фиксировать расход газа при условии малых длительностей импульсов по газу.

Практическая ценность модели процесса теплообмена в печи заключается в непосредственном использовании ее для построения графика термообработки, реализующего двухступенчатый режим отжига для массивных садок. При этом использовались результаты моделирования – выбирался график термообработки для пакета из пяти рядов с 16-17 трубами в ряду. Каждый этап термообработки рассматривался отдельно (рис. 18.166).

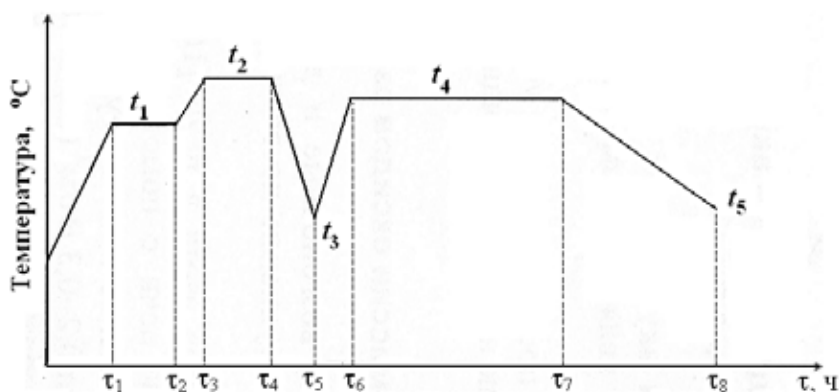


Рис. 18.166. Общий вид двухступенчатого графика термообработки для массивных садок

Для оптимизации времени термообработки, на этапе τ_1 , необходимо проводить наискорейший нагрев до температуры фазовых превращений t_1 , для которой уже на предварительном этапе исследований было принято значение $t_1 = 750^\circ\text{C}$. Однако в связи с тепловой инерционностью пакета быстрый нагрев печного пространства не гарантирует достижения центром пакета температуры t_1 . В этом случае приходится увеличивать время выдержки τ_2 , для выравнивания температуры садки. Слишком же большая длительность выдержки τ_2 , недопустима, поскольку уже при этих температурах для поверхностных слоев садки начинается медленное перлитное превращение при температуре 760°C . После ряда численных экспериментов для этапов τ_1 и τ_2 были выбраны следующие длительности: $\tau_3 = 3$ ч, $\tau_2 = 2$ ч. Данные значения обеспечивали достаточную

скорость нагрева при реализации импульсного способа отопления и небольшую длительность выдержки.

Температура выдержки t_2 выбиралась из необходимости выполнения согласованного растворения крупных карбидов на этапе τ_4 . Слишком высокая температура на данном этапе обуславливает появление пластинчатого перлита, что недопустимо по ГОСТ, слишком низкая – увеличивает время выдержки и снижает производительность печи. Оптимальным по данным ЦЗЛ ПНТЗ являлось кратковременное достижение всем пакетом температуры 820 °С. При исследованиях на модели был обнаружен перегрев пакета на 7–9 °С относительно температуры внутренней поверхности кладки, которая является управляющим параметром. Перегрев обусловлен наличием тепловых потерь через кладку печи и влиянием бугелей. Соответственно, для итогового графика термообработки была выбрана температура $t_2 = 810$ °С, обеспечивающая нагрев пакета до оптимальных температур. Длительность нагрева τ_3 выбиралась из требования кратковременности нахождения пакета при температуре t_1 и принята равной 1,33 ч.

Скорость охлаждения на этапе τ_5 подбиралась таким образом, чтобы поверхность пакета охладилась до температуры $\tau_3 = 650$ °С, а температура середины снизилась до конца превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ с учетом возможностей печи по охлаждению. Общее оптимальное время охлаждения составило $\tau_5 = 2$ ч.

Температура выдержки на этапе τ_7 задавалась ЦЗЛ ПНТЗ практически на границе перлитного превращения и составляла 785 °С. С учетом тепловых потерь через кладку печи, была принята температура, равная принята как $t_4 = 780$ °С. Время нагрева $\tau_6 = 1,5$ ч выбиралось исходя из тепловой инерционности садки на данном этапе и возможности значительного рассогласования температурных полей пакета в начале выдержки τ_7 за счет низкой температуры τ_4 .

Длительность выдержек τ_4, τ_7 задавалась согласно рекомендациям ЦЗЛ ПНТЗ и составила 1,77 и 5 ч соответственно. При выборе длительности выдержки τ_7 учитывалось время, необходимое для достижения центром пакета температуры t_4 полученное с помощью моделирования. Длительность контролируемого охлаждения τ_8 до температуры $t_5 = 670$ °С была получена на этапе выбора рациональной укладки и составила 5 ч.

Таким образом, с помощью математической модели был предложен более рациональный график термообработки, учитывающий особенности тепловой инерционности массивной трубной садки и возможности печи по реализации двухступенчатого отжига.

Результаты моделирования были использованы при определении режимных параметров действующей термической печи № 14 цеха № 5 ПНТЗ и в значительной мере способствовали успешному пуску и функционированию данной термической печи.

Все эти результаты в совокупности с конструктивным решением позволили, как уже отмечалось, достичь следующих показателей:

- система импульсного отопления с прямым цифровым управлением обеспечивает однородное поле температур в рабочем пространстве печи в режиме выдержки с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$;

- автоматизированная система стабилизации давления обеспечивает поддержание давления в рабочем пространстве печи в режиме выдержки на уровне 10–12 Па (1 ± 2 мм вод. ст.);

- двухступенчатый режим отжига и достигнутая точность регулирования температуры обеспечили снижение брака в среднем в пять раз (с 15 до 3 %) по сравнению с данными при использовании существующего парка печей, обеспечивающего одноступенчатый отжиг.

Принятый режим термообработки позволил почти в два раза снизить удельный расход топлива.

18.8.7. Управление нагревом в электрической печи сопротивления с детерминированным адаптивным регулятором

Рассматриваемая работа выполнялась в развитие предложенного авторами детерминированного адаптивного регулятора [18.1; 18.34; 18.42; 18.56] и в то же время в рамках диссертационной работы Е.Ю. Воронцова под руководством В. Г. Лисиенко [18.256–18.258].

Детерминированный адаптивный регулятор

В связи с нелинейностью моделей тепловой работы нагревательных электрических печей сопротивления, также как и в топливных нагревательных печах требуется корректировка по ходу нагрева настроек (адаптация) применяемых регуляторов, например, широко распространенных ПИД-регуляторов.

Устройства для адаптации регуляторов температуры печи применяют стохастические методы идентификации, включающих измерение температуры термопарой, систему автоматического регулирования температуры, блок расчета настроек регулятора (например, ПИД-регулятора) и блок корректировки настроек регулятора. При этом используются линейные модели объекта автоматического регулирования и в блоке коррекции настроек регулятора применяются известные методы определения настроек, например, метод Зиглера и Никольса, Копеловича, Ротача и др. [18.11; 18.12; 18.259–18.261].

Однако недостатком этих устройств является дискретный характер внесения коррекции настроек регулятора, что в случае нелинейного характера поведения объекта приводит к необходимости внесения частых дискретных возмущений на вход объекта и к динамическим отклонениям регулируемого параметра, в рассматриваемом случае температуры печи от заданных значений. Это, в свою очередь, приводит к возникновению дополнительных динамических погрешностей, нарушениям требований к качеству регулирования, особенно в условиях повышенных требований при нагреве ответственных материалов. Например, при нагреве под термообработку в электрической печи изделий из стали ШХ-15, титановых сплавов требуется точность регулирования $\pm 5^\circ\text{C}$ и менее.

Как отмечалось, был предложен способ детерминированной адаптации регулятора [18.56], при котором используются расчетные данные нелинейной модели объекта, позволяющие вносить непрерывную детерминированную коррекцию параметров линейной модели объекта без нанесения дополнительных активных возмущающих воздействий на вход объекта, что существенно улучшает качество регулирования и значительно уменьшает время адаптации регулятора. Однако при разработке этого способа и устройства отсутствовала конкретная привязка к регулированию температуры в электрической печи сопротивления, применяемые при этом датчики для измерения выходных параметров объекта представлены в обобщенном виде. Это затрудняет возможность их непосредственного использования в таком объекте как электрическая печь сопротивления, имеющая существенные характерные особенности отдельных элементов печи и тепловых режимов, а также особенности схемы автоматического регулирования температуры печи.

Таким образом недостатком этого устройства является невозможность его конкретного использования в сложных специфических

конструктивных и режимных условиях регулирования температуры в электрической печи сопротивления и представление датчиков для измерения выходных параметров объекта в обобщенном виде, без конкретной привязки к регулированию температуры в электрической печи сопротивления.

Задача предложенного устройства состояла в улучшении качества регулирования при нагреве материала в электрической печи сопротивления при сохранении непрерывности и быстродействия процесса адаптации регулятора температуры печи.

Для решения указанной задачи и было разработано устройство адаптации регулятора автоматического регулирования – электрическую печь сопротивления для нагрева. Оно включает (см. рис. 18.167 и 18.168) последовательно соединенные объект материала, датчик-термопару для регулирования температуры печи, элемент сравнения температуры печи и заданных значений температуры печи, регулятор температуры печи, элемент сравнения выходной величины регулятора и возмущающего воздействия, а также блок линейной модели температуры печи, блок расчета настроек регулятора температуры, блок коррекции настроек регулятора, при этом выход датчика-термопары соединен с элементом сравнения температуры печи и заданных значений температуры печи, выход элемента сравнения температуры печи и заданных значений температуры печи соединен с входом регулятора температуры печи, выход элемента сравнения выходной величины регулятора температуры печи и возмущающего воздействия соединен с входом объекта автоматического регулирования, выход блока расчета настроек регулятора связан с входами блока визуализации и блока коррекции настроек регулятора температуры печи, выход блока коррекции настроек регулятора связан с регулятором температуры печи.

Отличие данного устройства состоит в том, что оно дополнительно снабжено экранированной от нагреваемого материала термопарой, пирометром излучения, наведенного на поверхность материала, блоком базы данных и расчета степени черноты материала, блоком расчета температуры материала, блоком расчета коэффициента теплоотдачи излучением, блоком корректировки постоянной времени электрической печи сопротивления по температуре, при этом выходы экранированной термопары и пирометра излучения и выход блока базы данных и расчета степени черноты материала связаны с входом блока расчета температуры материала, выходы

экранированной термопары и блока расчета температуры материала связаны с входом блока расчета коэффициента теплоотдачи излучением, выход блока расчета коэффициента теплоотдачи излучением и выход блока линейной модели связаны с входом блока корректировки постоянной времени электрической печи сопротивления, выход блока корректировки постоянной времени электрической печи сопротивления связан с входом блока расчета настроек регулятора и с входом блока визуализации.

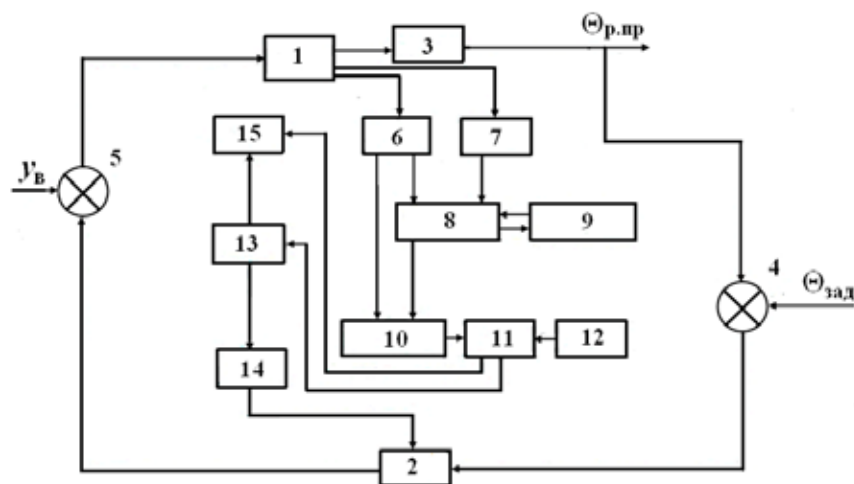


Рис. 18.167. Блок-схема управления нагревом с детерминированным адаптивным регулятором:

1 – рабочее пространство электрической печи сопротивления; 2 – регулятор температуры печи; 3 – регулирующая термопара; 4 – элемент сравнения температуры печи и заданных значений температуры печи; 5 – элемент сравнения выходной величины регулятора и возмущающего воздействия; 6 – экранированную термопару; 7 – пирометр излучения; 8 – блок расчета температуры материала; 9 – блок базы данных и расчета степени черноты материала; 10 – блок расчета коэффициента теплоотдачи излучением; 11 – блок корректировки постоянной времени электрической печи сопротивления по температуре; 12 – блок линейной модели температуры печи; 13 – блок расчета настроек регулятора; 14 – блок корректировки настроек регулятора температуры; 15 – блок визуализации скорректированных текущих параметров модели печи и настроек регулятора;

$\Theta_{\text{р.пр}}$ – выходная величина объекта регулирования - температура рабочего пространства печи по показаниям регулирующей термопары; $\Theta_{\text{зад}}$ – заданное значение температуры рабочего пространства печи; $y_{\text{в}}$ – возмущающее воздействие в процессе нагрева

Характерной особенностью электрической печи сопротивления является наличие в качестве элементов, обеспечивающих поступление теплоты в рабочее пространство печи, резисторов, а также наличие диатермической (не поглощающей излучение) атмосферы в рабочем пространстве.

Таким образом, теплообменная система печи включает три основных компонента: нагреваемый материал, стенки, свод и под печи (обмуровка печи) и резисторы (рис. 18.168). Используемая для управления тепловым режимом термопара при этом облучается этими тремя компонентами и представляет собой так называемую температуру печи.

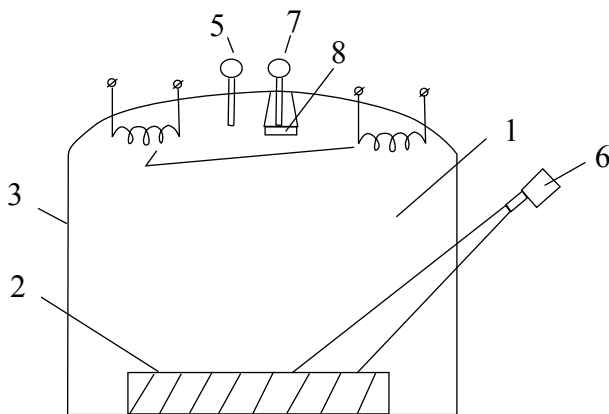


Рис. 18.168. Схема измерительной аппаратуры электрической печи сопротивления: 1 – рабочее пространство печи; 2 – нагревательный материал; 3 – обмуровка печи; 4 – резисторы-нагреватели; 5 – регулировочная термопара; 6 – пирометр излучения; 7 – экранированная термопара; 8 – экран

При использовании адаптивного регулятора [18.1; 18.56] линейное дифференциальное уравнение объекта регулирования представляется в виде:

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = Kx_{\text{вх}}, \quad (18.356)$$

где $x_{\text{вых}}$ и $x_{\text{вх}}$ – выходная и входная величины объекта; T – постоянная времени, с; K – коэффициент передачи.

При регулировании температуры в электрической печи сопротивления уравнение (18.356) конкретизируется в виде

$$T \frac{d\Theta_{\text{эф}}}{dt} + \Theta_{\text{эф}} = \Theta_{\text{рез}}, \quad (18.357)$$

где $\Theta_{\text{эф}}$ – эффективная температура печи [18.173]; $\Theta_{\text{рез}}$ – температура резисторов.

Для электрической печи сопротивления основой теплопередачи составляет перенос теплоты излучением и величина постоянной времени равна

$$T = \frac{mC}{\alpha_{\text{и}}F}, \quad (18.358)$$

где m , C и F – масса, удельная теплоемкость и поверхность термопары; $\alpha_{\text{и}}$ – коэффициент теплообмена излучением, равный

$$\alpha_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\text{вид}} (\Theta_{\text{эф}}^4 - \Theta_{\text{м}}^4)}{\Theta_{\text{эф}} - \Theta_{\text{м}}}, \quad (18.359)$$

где $\sigma_{\text{вид}}$ – видимый коэффициент теплоотдачи излучением, $\Theta_{\text{м}}$ – температура нагреваемого материала.

В соответствии с уравнениями (18.357) и (18.359) модель объекта описывается нелинейным уравнением и даже, например, при постоянстве коэффициентов m , C и F в уравнении (18.358) эта нелинейность зависит от изменения коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и}}$ в функции эффективной температуры печи в $\Theta_{\text{эф}}$ и температуры материала $\Theta_{\text{м}}$.

Корректировка постоянной времени T при изменяющейся в процессе нагрева материала величины $\alpha_{\text{и}}$ в соответствии с уравнением (18.358) проводится по соотношению

$$T_{\text{кор}} = T \frac{\alpha_{\text{и}}}{\alpha_{\text{и.кор}}F}, \quad (18.360)$$

где T и $\alpha_{\text{и}}$ – величины при условии линейной модели электрической печи сопротивления; $T_{\text{кор}}$ и $\alpha_{\text{и.кор}}$ – соответствующие скорректированные значения.

При измерении температуры поверхности материала $\Theta_{\text{п}}$ пирометром излучения и определении эффективной температуры печи $\Theta_{\text{эф}}$

балансовое уравнение теплоты излучением имеет вид (с учетом отраженного от поверхности материала потока излучения)

$$\sigma_0 \Theta_{\Pi}^4 = \varepsilon_{\text{м}} \sigma_0 \Theta_{\text{м}}^4 + \sigma_0 \Theta_{\text{эф}}^4 (1 - \varepsilon_{\text{м}}), \quad (18.361)$$

где σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана-Больцмана; $\sigma_0 = 5,57 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴)); $\varepsilon_{\text{м}}$ – степень черноты поверхности материала; $\Theta_{\text{м}}$ – истинная температура материала, К.

Из уравнения (18.361) следует, что температура материала равна

$$\Theta_{\text{м}} = \sqrt[4]{\frac{\Theta_{\Pi}^4 - \Theta_{\text{эф}}^4 (1 - \varepsilon_{\text{м}})}{\varepsilon_{\text{м}}}}. \quad (18.362)$$

При широко распространенном способе в действующих электрических печах сопротивления измерения температуры в печи открытой термопарой на ее спай попадают потоки излучения стенок печи, резисторов и материала. Поэтому температура открытой термопары не может быть использована для подстановки в уравнение (18.362). При определении эффективной температуры $\Theta_{\text{эф}}$ должно исключаться влияние на нее температуры поверхности металла $\Theta_{\text{м}}$.

Предлагается эффективную температуру в электрической печи сопротивления принимать на 50 °С выше конечной температуры металла (см. [18.173, стр. 275]). Однако такой метод не может быть применим в случае управления процессом нагрева, так как эффективная температура непрерывно изменяется в процессе нагрева.

Для непрерывного определения эффективной температуры печи предложено устанавливать в рабочем пространстве печи дополнительную термопару с экраном, экранирующим рабочий спай термопары от излучения материала (см. рис. 18.168). Этот экран изготовлен из керамического огнеупорного материала, его конструкция выполнена либо многослойной с воздушными прослойками, либо в виде экрана Шака с продольными отверстиями в толще керамического экрана.

В формуле (18.362) при определении температуры материала требуется использование данных о степени черноты материала. Известно, что степень черноты материала зависит от его температуры

$$\varepsilon_{\text{м}} = f(\Theta_{\text{м}}). \quad (18.363)$$

Конкретное значение функции (18.363) зависит от природы нагреваемого материала и состояния его поверхности. Для многих материалов (металлы, диэлектрики, полупроводники) подробные данные о функции (18.363) приведены, например, в [18.27; 18.202; 18.262–18.266]. В частности, для металлов с чистой полировочной поверхностью величина ε_m вычисляется, например, с использованием формулы Ашкинасса

$$\varepsilon_m = 0,576\sqrt{\rho_3\Theta_m}, \quad (18.364)$$

где ρ_3 – величина удельного сопротивления металла.

В реальных условиях нагрева материала его поверхность может иметь шероховатость и окисные пленки, и тогда зависимость величины ε_m от температуры может существенно измениться. В этом случае для различных материалов используются данные, приведенные либо в графической, либо в табличной форме.

Был реализован блок базы данных по зависимостям (18.363), которые должны быть представлены для конкретных условий нагрева того или иного материала. Эти данные представлялись в аналитической, графической или табличной форме.

После измерений величины $\Theta_{эф}$ и $\Theta_{п}$ используются полученные из базы данных по зависимостям (18.363) или (18.364) степени черноты материала и далее определяется по формуле (18.362) величина Θ_m и оцениваются величины ε_m и Θ_m . С использованием формулы (18.362) определяется величина $\alpha_{и.кор}$ и по формуле (18.360) вводится корректировка на постоянную времени $T_{кор}$. Определение динамического параметра модели объекта $T_{кор}$ позволяет оценивать и адаптировать настройки регулятора температуры печи по методикам [18.12; 18.259–18.261].

Проведем описание функционирования данного устройства.

Объект регулирования 1 (см. рис. 18.167) представляет собой рабочее пространство электрической печи сопротивления 1 (см. рис. 18.168) для нагрева материала 2, например, металл под пластическую или термическую обработку. Регулирующая термopара 3 (см. рис. 18.167), 5 (см. рис. 18.168) в совокупности с регулятором 2 элементами сравнения 4 и 5 (см. рис. 18.167) осуществляют регулирование температуры рабочего пространства печи в соответствии с заданным значением температуры $\Theta_{зад}$ по отклонению от задания по принци-

пу отрицательной обратной связи с компенсацией возмущающего воздействия y_v (колебания напряжения в управляющей сети печи, открытие рабочих окон и т. д.).

Блок линейной модели 12 (см. рис. 18.167) содержит линейную модель по температуре печи с формально определенной постоянной времени печи по температуре T и коэффициентом теплоотдачи излучения α_n (см. уравнения (18.357) и (18.358)). Показания экранированной термопары 6 $\Theta_{эф}$ (рис. 18.167), 7 (рис. 18.168) с экраном 8 (рис. 18.168), пирометра излучения 7 Θ_n (рис. 18.167), 6 (см. рис. 18.168), а также данные о степени черноты металла ем (блок 9, см. рис. 18.167) используются в блоке 8 (см. рис. 18.167) для расчета температуры материала Θ_m по формуле (18.362). С использованием показаний экранированной термопары 6 (см. рис. 18.167), 1 (см. рис. 18.168) и рассчитанного в блоке 8 температуры материала в блоке 10 (см. рис. 18.168) проводится расчет текущего значения коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{и.кор}$ (см. формулу (18.359)).

Данные о коэффициенте теплоотдачи излучением $\alpha_{и.кор}$ (см. рис. 18.167) поступают из блока 10 в блок 11, в котором проводится корректировка постоянной времени печи по температуре $T_{кор}$ с использованием данных линейной модели печи (блок 12) и формулы (18.360). Данные о постоянной времени печи по температуре используются в блоке 13 (см. рис. 18.167) для расчета настроек регулятора. Данные о настройках регулятора используются для корректировки настроек регулятора в блоке 14 и вводятся в схему регулятора 2. Блок 15 осуществляет визуализацию данных о текущих значениях настроек регулятора (блок 13) и постоянной времени объекта $T_{кор}$ (блок 11).

Результатом является улучшение качества автоматического регулирования за счет уменьшения динамических погрешностей процесса регулирования.

Пример реализации устройства

Регулирование температуры в электропечи сопротивления для нагрева титановых изделий. Этот пример является весьма типичным для многих весьма ответственных технологических процессов, в которых осуществляется нагрев самых различных материалов, при этом требования к равномерности и точности нагрева к настоящему времени часто достигают уже метрологически предельных значений ($\pm 5^\circ\text{C}$).

В соответствии с предложенным устройством, электропечь сопротивления снабжена регулирующей термопарой, экранированной термопарой, пирометром излучения, наведенного на поверхность титанового изделия (см. рис. 18.167 и рис. 18.168) и ПИД-регулятором для регулирования температуры печи.

Оценим требуемые настройки ПИД-регулятора на примере начала нагрева и конца нагрева.

В начале нагрева эффективная температура печи по показаниям экранированной термопары $\Theta_{\text{эф}} = 1395 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1668 \text{ K}$; температура, показываемая пирометром излучения $\Theta_{\text{п}} = 1440 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1713 \text{ K}$. В начале нагрева температура поверхности металла невысокая и поверхность не окисленная, тогда по данным [18.27, с. 250, рис. 40] степень черноты титана $\varepsilon_{\text{м}} = 0,3$. Эти данные вводятся в блок 9 базы данных (см. рис. 18.167). В блоке 8 с использованием этих данных определяется температура металла.

По формуле (18.362) определяется температура металла в начале нагрева

$$\Theta_{\text{м}} = \sqrt[4]{\frac{1668^4 - 1823^4(1 - 0,3)}{0,3}} = 423 \text{ K} = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

В конце нагрева эффективная температура печи $\Theta_{\text{эф}} = 1800 \text{ }^{\circ}\text{C} = 2073 \text{ K}$. Температура, показываемая пирометром, $\Theta_{\text{п}} = 1382 \text{ }^{\circ}\text{C} = 1665 \text{ K}$.

В конце нагрева поверхность титана окислена, при этом по данным [18.27, с. 250, рис. 40] $\varepsilon_{\text{м}} = 0,65$.

По формуле (18.362)

$$\Theta_{\text{м}} = \sqrt[4]{\frac{1655^4 - 2073^4(1 - 0,65)}{0,65}} = 1124 \text{ K} = 851 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

В блоке 10 по формуле (18.359) определяется коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и.кор}}$ при $\sigma_{\text{вид}} = 3,2 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ (находится по известным соотношениям [18.16; 18.173; 18.262–18.268])

для начала нагрева

$$\alpha_{\text{и.кор}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-8} (1823^4 - 423^4)}{1823 - 423} = 251 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)};$$

для конца нагрева

$$\alpha_{\text{и.кор}} = \frac{3,2 \cdot 10^{-8} (2073^4 - 1124^4)}{2073 - 1124} = 568,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

В блоке линейной модели 12 (см. рис. 18.167) по температуре печи, предполагающей постоянство постоянной времени объекта T , с использованием методики идентификации (например, кривой разгона) определим для некоторых усредненных параметрах нагрева: время запаздывания $\tau_{\text{зап}} = 15$ с и постоянная времени объекта $T = 200$ с при характерном для процесса нагрева значении коэффициента теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и}} = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В блоке 9 приводится таблица корректировки постоянных времени объекта с использованием формулы (18.360).

В частности, для начала нагрева

$$T_{\text{кор}}^{\text{н}} = 200 \frac{350}{251,7} = 278,1 \text{ с.}$$

До конца нагрева

$$T_{\text{кор}}^{\text{н}} = 200 \frac{350}{568,9} = 123,0 \text{ с.}$$

Таким образом, в процессе обработки материала постоянная времени объекта изменилась в 2,26 раза, что требует существенной корректировки настроек регулятора.

Так в случае ПИД-регулятора его настройки рассчитываются в блоке 13 [18.259–18.261], например, с использованием методики Копеловича для аperiodического процесса регулирования по формулам [18.261]

$$K_p = \frac{0,95 T_{\text{кор}}}{K \tau_{\text{зап}}}, \quad T_{\text{и}} = 2,4 \tau, \quad T_{\text{д}} = 0,4 \tau, \quad (18.365)$$

где K_p , $T_{\text{и}}$ и $T_{\text{д}}$ – настройки регулятора – коэффициент пропорциональности, время интегрирования и время дифференцирования соответственно.

Тогда для начала нагрева

$$K_p = \frac{0,95 \cdot 278,1}{1 \cdot 15} = 17,6; \quad T_{\text{и}} = 2,4 \cdot 15 = 36 \text{ с}; \quad T_{\text{д}} = 0,4 \cdot 15 = 6 \text{ с};$$

для конца нагрева

$$K_p = \frac{0,95 \cdot 123,0}{1 \cdot 15} = 7,79; \quad T_{ii} = 2,4 \cdot 15 = 36 \text{ с}; \quad T_d = 0,4 \cdot 15 = 6 \text{ с}.$$

Таким образом, в соответствии с изменением постоянной времени настройки ПИД-регулятора также изменяются от начала до конца нагрева 2,26 раза. Эти расчетные значения настроек регулятора используются в блоке корректировки настроек регулятора температуры 14 и вводятся в схему регулятора 2 (см. рис. 18.167).

Соответствующее изменение настроек ПИД-регулятора электрической печи сопротивления обеспечивает непрерывное по ходу процесса нагрева качество процесса регулирования с наименьшими возможными динамическими отклонениями температуры от задания и временем регулирования.

Таким образом, предлагаемое устройство адаптации регулятора обеспечивает непрерывную во времени коррекцию настроек регулятора в конкретных условиях электрической печи сопротивления и тем самым поддерживает высокое качество регулирования (динамическое отклонение, время регулирования) без внесения дополнительных идентификационных возмущений на вход данного объекта.

Устройство было испытано на электрических нагревательных печах завода «Уралкабель» и показало положительные результаты.

Для функционирования детерминированного адаптивного регулятора в электрической нагревательной печи, как показано выше, важна оценка температуры нагреваемого материала. Известно, что непрерывное определение температуры металла на действующей печи представляет определенные трудности, тем не менее преодолеваемые, как показано в ряде работ авторов с коллегами (см. [18.27; 18.45; 18.202]). Все же представляет интерес возможность расчетной оценки температур нагреваемого материала и ее компьютерная реализация с тем, чтобы иметь возможность использования этой информации в качестве вспомогательной при функционировании в реальном времени детерминированного адаптивного регулятора. Одновременно важно прогнозировать и время нагрева до данной температуры.

Соответствующие методы расчета достаточно подробно описаны в литературе [18.1–18.3; 18.173], важно было представить возможность

компьютерной реализации моделирования процесса нагрева. При этом, имея в виду работу моделирующего устройства в темпе с процессом, принимались наиболее упрощенные расчетные схемы [18.258].

В представленном примере принято, что нагрев изделия проводится в два этапа. Первый этап проходит при постоянном тепловом потоке. Второй этап проходит при постоянной температуре садки.

Упрощенная структурная схема модели представлена на рис. 18.169.

Структурная схема модели включает в себя: 1 – блок считывания входных данных; 2 – блок предварительных расчетов; 3 – блок оценивания массивности изделия; 4 – блок расчета времени нагрева изделия; 5 – блок считывания значений числа подобия Фурье; 6 – блок отображения результатов расчета.

Модель работает следующим образом. Входные данные из блока 1 расчетов поступают в блок 2, где определяются коэффициент теплоотдачи, температура печи и температура изделия в конце первого периода нагрева [18.173; 18.267].

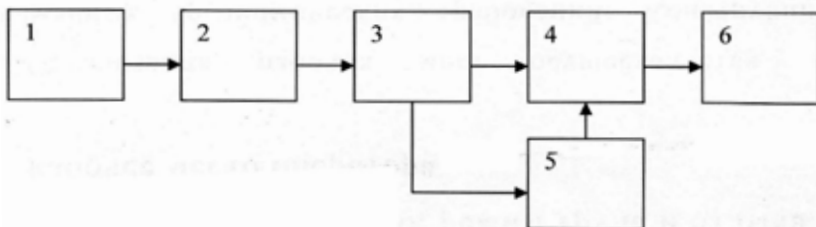


Рис. 18.169. Структурная схема модели расчета времени нагрева материала: блоки модели:

- 1 – считывания входных данных; 2 – предварительных расчетов;
- 3 – оценивания термической массивности; 4 – расчета времени нагрева;
- 5 – считывания значения числа подобия Фурье; 6 – отображения результатов

В блоке 3 оценивается термическая массивность материала. Как известно, термически тонким называются изделия, скорость нагрева которого практически не отличается от скорости нагрева изделия из материала с бесконечной теплопроводностью, у которого внутренний перепад температур всегда близок к нулю. Изделия, при расчете которых нельзя пренебречь внутренним перепадом температур, являются термически массивными [18.173; 18.261].

Степень термической массивности металла зависит не только от его толщины, но и от его теплопроводности, и от коэффициента теплоотдачи на его поверхность, а следовательно, и от температуры печи. С учетом этого степень массивности тела может быть охарактеризована числом подобия:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} S, \quad (18.366)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, λ – коэффициент теплопроводности, S – характерный размер.

Согласно [18.173; 18.267] величина $Bi < 0,25$ соответствует термически тонким изделиям, при $Bi > 0,5$ – область термически массивных изделий. Значениям $0,25 < Bi < 0,5$ соответствует переходная область. При расчете нагрева тел, попадающих в эту область, следует их рассматривать как термически массивные.

Если изделие – термически тонкое тело, то в блоке 4 (см. рис. 18.169) проводится расчет времени нагрева по выражению:

$$\tau = \frac{G_{\text{изд}} \cdot c (T_{\text{изд.К}} - T_{\text{изд.Н}})}{q_{\text{п}} \cdot F_{\text{изд}} \cdot 3600}, \quad (18.367)$$

где $G_{\text{изд}}$ – масса изделия; c – удельная теплоемкость материала; $T_{\text{изд.К}}$ – температура изделия в конце периода нагрева; $T_{\text{изд.Н}}$ – температура изделия в начале периода нагрева.

Если изделие термически массивное, то из блока 5 считаются значения чисел подобия Фурье. После чего в блоке 4 рассчитывается время нагрева:

$$\tau = \frac{Fo \cdot S^2}{\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot 3600}, \quad (18.368)$$

где Fo – число подобия Фурье; ρ – удельная плотность материала.

Необходимо учитывать и существенную для процесса нагрева нелинейность – зависимость удельной теплоемкости нагреваемого материала c от температуры материала. Большинство материалов характеризуются ростом удельной теплоемкости c температурой. Например, для цветных сплавов достаточно типичной является температурная зависимость типа [18.268]:

$$c = c_0 + 2 \cdot \alpha_t \cdot T, \quad (18.369)$$

где c_0 – теплоемкость сплава при 0°C ; α_t – температурный коэффициент теплоемкости; T – температура, $^\circ\text{C}$.

В качестве компьютерной реализации была построена модель расчета времени и температуры нагрева в системе Simulink MATLAB (рис. 18.170).

Модель позволяет быстро, в реальном времени оценивать температуру и время нагрева применительно электрической печи сопротивления. Она может быть использована для сопровождения системы и управления в электрических нагревательных печах.

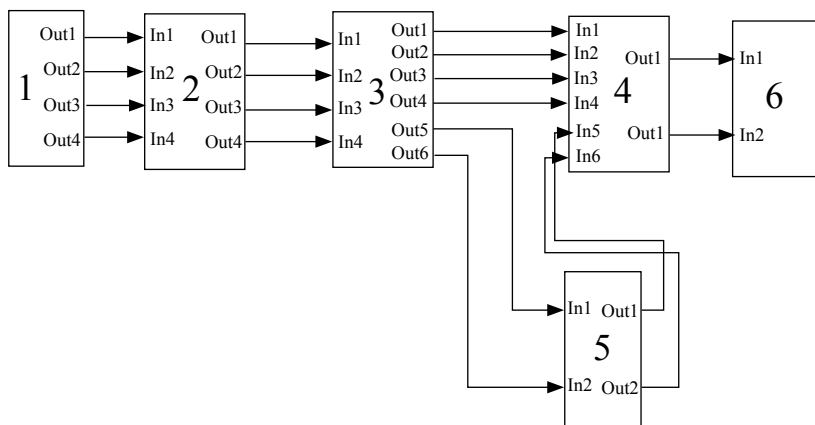


Рис. 18.170. Модель расчета температур и времени нагрева металла в электрической печи сопротивления (обозначения – см. рис. 18.169)

18.8.8. Диагностика режимов нагрева металла в печах камерного типа

Для решения задач оптимального управления и выбора оптимальных технологических режимов по технологическим критериям в нагреваемых печах в Белорусском государственном техническом университете разработаны оригинальные методы, в том числе и метод магистральной оптимизации (В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седако, В.И. Панасюк, В.И. Тимошпольский, Ф.М. Бабушкин, В.С. Тимофеев, В.Н. Папкович, П.В. Батище, С.М. Козлов и др.). Конечно, эти методы носят приближенный характер, при этом используют одномерное приближение без оценки локальных параметров, «серое» при-

ближение в задачах теплообмена и т.д. Скорее результатом решений с использованием данных методик может быть применение не для детерминированных расчетов, а например, верхнем уровне управления АСУ нагревом, где как отмечалось, важным является условие быстрогодействия при использовании ЭВМ. При этом могут исследоваться задачи оптимального управления по минимуму расхода топлива, окалинообразования и т. д. [18.33; 18.42; 18.45; 18.269; 18.270].

Режим нагрева с целью уменьшения окалинообразования

Задачи оптимального управления и диагностики тепловых режимов с акцентом на уменьшение образования окалины в камерных печах были рассмотрены с участием В. Г. Лисиенко в работе [18.271].

Это характерный пример решения задач оптимального управления и последующей диагностики для процессов нагрева металла применительно к печам камерного типа. Введение нелинейных составляющих в математическое описание изучаемого процесса позволяет построить более адекватную модель, поэтому была сформулирована нелинейная задача минимизации окалины для печей камерного типа при нагреве излучением и конвекцией.

Задано, что процесс изменения температуры греющей среды и металла описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} \frac{dT_r}{dt} = A_1 U - A_2 T_r - A_3 (T_r - T); \\ \frac{dT}{dt} = \alpha_1 (T_r - T) + \sigma_1 (T_r^4 - T^4) \end{cases} \quad (18.370)$$

с начальным

$$T_r(0) = T_{r0}, T(0) = T_0 \quad (18.371)$$

и конечным условиями

$$T(t_k) = T_k, \quad (18.372)$$

где $T_r(t)$, $T(t)$ – температуры греющей среды и нагреваемого металла соответственно; $U(t)$ – расход газа в момент времени t ; T_0 , T_k – начальная и конечная температуры металла соответственно; t_k – время окончания нагрева; α_1 , σ_1 , A_1 , A_2 , A_3 – положительные константы, характеризующие динамику процесса нагрева.

Из условия достижимости температуры металла T_k и других физических ограничений полагали, что

$$0 < T_0 < T_k < \beta; \quad t_k \geq t_{\min}; \quad A_3 > A_2; \quad \frac{A_1}{A_2} U_h < T_k; \quad (18.373)$$

$$0 \leq U_h \leq U(t) \leq U_k. \quad (18.374)$$

Здесь U_h, U_k – минимальный и максимальный расходы газа соответственно; t_{\min} – минимальное время нагрева металла от температуры T_0 до T_k ; β – заданная постоянная, характеризующая динамику окисления металла.

Был введен в рассмотрение критерий качества, который определяет количество окалины в конце нагрева [18.269]:

$$I = \int_0^{t_k} \frac{\vartheta}{T(t)} \exp(-\beta / T(t)) dt, \quad (18.375)$$

где ϑ – заданная константа.

Задача оптимального управления заключается в выборе режима изменения расхода газа во времени $U(t)$ ($0 < t < t_k$) в виде кусочно-непрерывной функции, удовлетворяющей условию (18.374), которая на решениях (18.370)–(18.372) доставляет минимальное значение функционалу (18.375).

Была оценена производная подинтегральной функции функционала (18.375) $F(T) = \frac{\vartheta}{T} e^{-\beta/T}$. Получили с использованием соотношений (18.373)

$$F(T) = \frac{\vartheta}{T^2} e^{-\beta/T} \left(\frac{\beta}{T} - 1 \right) > 0, \quad T \in [T_0, T_k]. \quad (18.376)$$

При $T_1 \geq T_2 \geq T_0$ величина $F(T_1) \geq F(T_2)$, т. е. чем ниже температура металла, тем меньшее значение принимает подинтегральная функция.

Обозначили через $W_\Gamma(t)$, $W(t)$ траекторию, которая находится в результате интегрирования уравнений (18.370), при $U(t) = U_h$ с начальными условиями (18.371).

Для любого допустимого процесса задачи (18.370)–(18.374) и величин $T_\Gamma(t)$, $T(t)$, $U(t)$ доказано, что

$$T(t) \geq W(t); \quad t \in [0, t_k].$$

Поэтому $F(T(t)) \geq F(W(t)); t \in [0, t_k];$

$$\int_{t_1}^{t_2} F(T(t)) dt \geq \int_{t_1}^{t_2} F(W(t)) dt; \quad 0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_k.$$

Доказано, что $W_r(t)$, $W(t)$ – БОТ, $U_w(t) = U_h$ [18.272]. Найдено решение задачи со свободным левым концом траектории $\Phi_r(t)$, $\Phi(t)$.

Определен момент времени $t_2 < t_k$, при котором уравнения (18.370) с граничными условиями $T(t_2) = W(t_2)$, $T_r(t_2) = W_r(t_2)$, $T(t_k) = T_k$ на отрезке $[t_2, t_k]$ имеют решение $\Phi_r(t)$, $\Phi(t)$, где при $t_2^1 > t_2$ аналогичная граничная задача неразрешима при всевозможных допустимых режимах изменения расхода газа.

Траектория $\Phi_r(t)$, $\Phi(t)$ может быть получена как решение следующих уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_r}{dt} = A_1 U_k - A_2 \Phi_r - A_3 (\Phi_r - \Phi); \\ \frac{d\Phi}{dt} = \alpha_1 (\Phi_r - \Phi) + \sigma_1 (\Phi_r^4 - \Phi^4); \end{cases} \quad (18.377)$$

$$\begin{aligned} \Phi(t_2) &= W(t_2); \Phi_r(t_2) = W_r(t_2); \Phi(t_k) = T_k; \\ t_2 &\leq t \leq t_k. \end{aligned} \quad (18.378)$$

Показано, что параметры $\Phi_r(t)$, $\Phi(t)$, $t_2 \leq t \leq t_k$ и t_2 являются искомой траекторией и временем. Принято, что величины $X_r(t)$, $X(t)$ – оптимальное решение соответствующей задачи со свободным левым концом траектории на отрезке $[t_2, t_k]$, тогда $X(t_2) > \Phi(t_2)$, так как иначе это противоречит выбору времени t_2 . В силу непрерывности функций $X(t)$ и $\Phi(t)$ на отрезке $[t_2, t_k]$ и в соответствии с уравнениями (18.377), (18.378) существует соотношение $t^1 < t_k : X(t^1) = \Phi(t^1)$. Очевидно, что $X(t) = \Phi(t)$, $t_k \geq t \geq t^1$ и $X(t) > \Phi(t)$, $t^1 \geq t \geq t_k$. Отсюда получено уравнение

$$\int_{t_2}^{t_k} \frac{9}{\Phi(t)} \exp(-\beta / \Phi(t)) dt < \int_{t_2}^{t_k} \frac{9}{X(t)} \exp(-\beta / X(t)) dt, \quad (18.379)$$

т. е. значения $X_r(t)$, $X(t)$ не являются оптимальным решением задачи со свободным левым концом траектории на отрезке $[t_2, t_k]$. Получено

противоречие, поэтому $\Phi_g(t)$, $\Phi(t)$ – оптимальное решение задачи со свободным левым концом траектории.

Согласно [18.272], управление

$$U(t) = \begin{cases} U_h, & 0 \leq t \leq t_2; \\ U_k, & t_2 < t < t_k \end{cases} \quad (18.380)$$

является оптимальным.

Для иллюстраций данного подхода была составлена программа для ПЭВМ, в которой использован метод деления отрезка $[0, t_k]$ пополам.

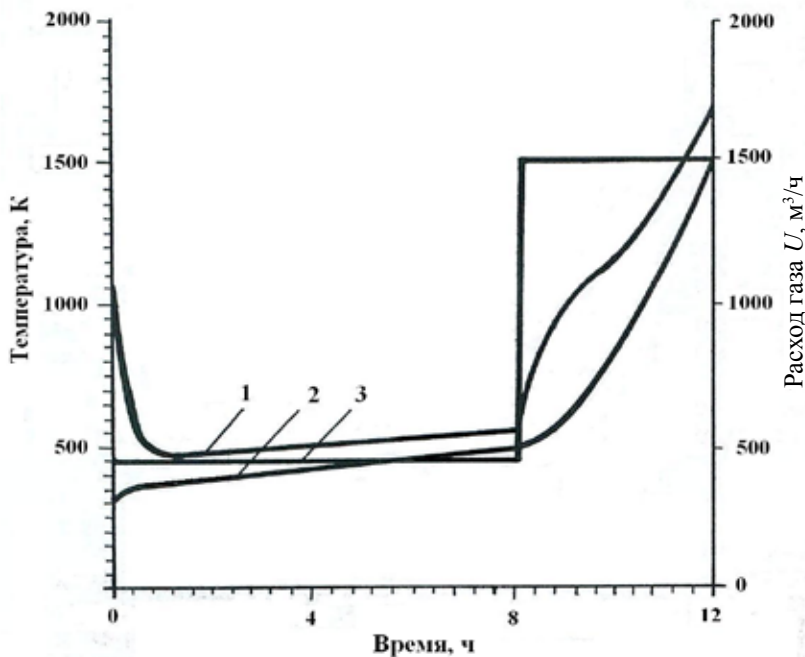


Рис. 18.171. Графики оптимального нагрева заготовок: температуры: 1 – среды; 2 – металла; 3 – расход газа

Числовые данные для примера расчета были приняты следующими:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,15 \text{ 1/ч}; \sigma_1 = 0,15 \times 10^{-9} \text{ 1/(ч} \cdot \text{K}^3); A_1 = 1,3176 \text{ K/м}^3; \\ A_2 &= 0,6516 \text{ 1/ч}; A_3 = 3,0492 \text{ 1/ч}; t_k = 12 \text{ ч}; T_0 = 300 \text{ K}; \\ T_k &= 1500 \text{ K}; T_{r0} = 1050 \text{ K}; U_h = 450 \text{ м}^3/\text{ч}; U_k = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ \vartheta &= 2000; \beta = 3000. \end{aligned}$$

На рис. 18.171 приведены изменения во времени оптимальной температуры греющей среды и металла, а также расхода газа. Момент переключения $t_2 = 8,156$ ч, минимальное количество окалины – $0,323$ кг/м².

Таким образом, режим нагрева металла до заданной температуры, обеспечивающий минимальное количество окалины, характеризуется двумя интервалами времени, при которых расход газа соответственно минимальный и максимальный.

Режим нагрева с целью уменьшения обезуглероживания металла и расхода топлива

Как известно, основными факторами, влияющими на величину обезуглероженного слоя металла, являются: температура поверхности металла, продолжительность нагрева, состав печной атмосферы, химический состав стали [18.273]. В работе была рассмотрена возможность уменьшения данного слоя металла за счет выбора температурных режимов работы печи [18.274].

Предлагаемый подход к решению такого рода задачи был основан на выделении наилучших режимов работы печи, с использованием которых определяется оптимальный режим ее функционирования, удовлетворяющий основным технологическим ограничениям.

Рассмотрена задача оптимального по минимуму обезуглероженного слоя нагрева призмы в условиях радиационно-конвективного теплообмена с учетом ограничений на температуру печи. Согласно допущениям [18.275], для процесса нагрева металла в проходной печи использована следующая система уравнений:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (18.381)$$

$$0 \leq x \leq R_1, \quad 0 \leq y \leq R_2, \quad 0 \leq t \leq t_k;$$

начальные условия (холодный посад)

$$T(x, y, 0) = T_0; \quad (18.382)$$

граничные условия:

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R_1, y, t)}{\partial x} = \alpha(T_{\text{пч}} - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4(R_1, y, t));$$

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0; \quad (18.382, a)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x, R_2, t)}{\partial y} = \alpha(T_{\text{пч}} - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4 - T^4(x, R_2, t));$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial y} = 0; \quad (18.382, б)$$

где t – текущее время; t_k – время окончания процесса нагрева; R_1, R_2 – половина длины и ширины узкой грани призмы; x, y – текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от ее центра; $T_{\text{пч}} = T_{\text{пч}}(t)$ – температура печи (функция управления); $\lambda(T)$, $C(T)$, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала соответственно; T_0 – начальное равномерное распределение температуры в призме; $T(x, y, t)$ – температура в точке (x, y) в момент времени t .

Таким образом, было принято, что вдоль оси Z (по высоте призмы) изменение температуры незначительно и им можно пренебречь.

С учетом технологических ограничений на температуру печи $T_{\text{пч}}$ полагали, что

$$A_1 \leq T_{\text{пч}}(t) \leq A_2, t \in [0, t_k], \quad (18.383)$$

где A_1, A_2 – максимальное и минимальное значения температуры печи соответственно.

Так как в конце нагрева заготовка должна иметь распределение температуры по сечению как можно ближе к заданному равномерному, введено ограничение

$$\begin{cases} \max |T(x, y, t_k - T_k)| \leq \varepsilon, \\ x \in [0, R_1] \\ y \in [0, R_2] \end{cases} \quad (18.384)$$

где $\varepsilon > 0$ – некоторая постоянная; T_k – желаемое распределение температуры в призме (ее значение зависит от марки стали и определяется из условий прокатки).

Было принято, что на поверхности призмы образуется обезуглероженный слой с максимальной величиной ω на ребре (самая горячая точка). При этом его величина в данной точке может быть определена по формуле [18.273]

$$-(\dot{y}_k) \int_0^{t_k} \exp\left\{\frac{-\beta}{T(R_1, R_2, t)}\right\} dt, \quad (18.385)$$

где κ , β – положительные постоянные, характеризующие величину роста толщины выгоревшего слоя [18.273].

Задача оптимального управления нагревом призмы заключалась в выборе температуры печи $T_{\text{пч}}(t)$ ($0 \leq t \leq t_k$) в классе кусочно-непрерывных функций, которая удовлетворяет ограничению (18.383) и на решениях температурной задачи (18.381), отвечающих условию (18.384), при этом обеспечивается минимальное значение величины $\omega(t_k)$.

Использованием результатов [18.271], можно было доказать, что оптимальная температура печи $T_{\text{пч}}(t)$ запишется в виде

$$T_{\text{пч}}(t) \begin{cases} A_1 & \text{при } 0 \leq t \leq t^*; \\ A_2 & \text{при } t^* \leq t \leq t_k, \end{cases}$$

где момент переключения управления t^* находится следующим образом.

Пусть $T_1(x, y, t)$ – решение задачи (18.381)–(18.382, б) при $t \in [0, t_1]$, $(x, y) \in [0, R_1] \times [0, R_2]$, $T_{\text{пч}} = A_1$. При этом дифференциальное уравнение (18.381) с граничными условиями (18.382, а), (18.382, б), начальными условиями

$$T(x, y, t_1) = T_1(x, y, t_1), \quad T_{\text{пч}}(t) \equiv A_2 \quad (18.386)$$

имеет решение $T_2(x, y, t)$ при $t_1 < t \leq t_k$, $0 \leq x \leq R_1$, $0 \leq y \leq R_2$, удовлетворяющее ограничению (18.384), а при большем значении t_1 ограничение (18.384) не выполняется. Тогда $t^* = t_1$.

Следовательно, чтобы построить оптимальный температурный режим работы печи, необходимо найти момент переключения управления t^* .

В силу того, что получить аналитическое решение температурной задачи (18.381)–(18.382, б) не представлялось возможным, величину t^* приходилось определять численно с применением ЭВМ.

Для решения данной задачи был разработан пакет программ для ЭВМ, который позволяет выполнять следующие функции:

- моделировать работу металлургических печей различных типов;

- проводить идентификацию процесса нагрева по заданным экспериментальным кривым;
- получать оптимальные температурные режимы работы металлургической печи по заданным технологическим параметрам для уменьшения величины окалины и обезуглероженного слоя, минимизации расхода топлива;
- проводить расчеты при неоднородной начальной температуре (горячий посад).

В качестве примера был рассмотрен нагрев заготовки $0,125 \times 0,125$ м в проходной печи Белорусского металлургического завода.

Параметры, характеризующие динамику нагрева и обезуглероживания, выбирались по справочным и экспериментальным данным [18.273; 18.275]. Для малоуглеродистой стали: $R_1 = 0,0625$ м; $R_2 = 0,0625$ м; $T_k = 1200$ °С; $T_0 = 27$ °С; $t_k = 1380$ °С; $A_1 = 550$ °С; $A_2 = 1250$ °С; $\rho = 7800$ кг/м³; $\alpha = 30$ Вт/(м² · К); $\sigma = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Вт(м² · К⁴); $\varepsilon = 20$ °С.

По результатам расчетов момент переключения составил $t^* = 8193,75$ с. Обезуглероженный слой в конце процесса нагрева равен 1,228 мм.

Динамика изменения температуры в характерных точках сечения призмы и рост толщины обезуглероженного слоя в процессе нагрева приведены на рис. 18.172. Суммарный расход газа при этом составил 380 м³.

Анализ результатов показывает, что после момента переключения $t^* = 8193,75$ с происходит интенсивный рост температуры поверхности и, как следствие, увеличивается интенсивность обезуглероживания. До данного момента времени обезуглероживание минимальное. При моделировании работы печи в соответствии с технологическим режимом, обезуглероженный слой составил 1,895 мм, суммарный расход газа - 500 м³.

Следовательно, режим работы печи $T_{\text{пч}} \equiv A_1$ – наивыгоднейший в том смысле, что если начальные условия одинаковы, то к любому моменту времени величина обезуглероженного слоя будет наименьшей по сравнению с другими режимами нагрева.

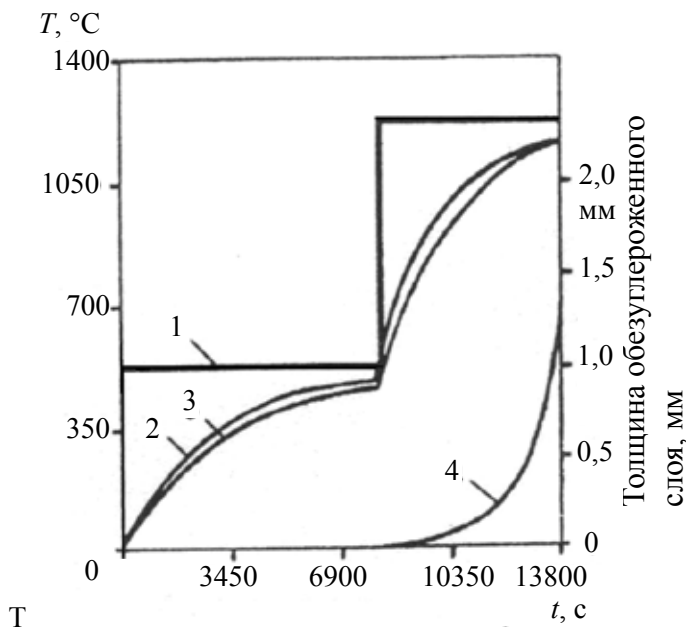


Рис. 18.172. График оптимального нагрева заготовок: температуры: 1 – среды; 2 – поверхности заготовки; 3 – центра заготовки; 4 – толщина обезуглероженного слоя

Таким образом, на основании исследования магистральных свойств задачи управления нагревом металла в печи получен режим, обеспечивающий выполнение основных технологических ограничений, состоящий из двух интервалов, на которых температура печи соответственно минимальна и максимальна. Достигнуто уменьшение обезуглероженного слоя в 1,5 раза. Суммарный расчетный расход газа при нагреве металла снижен на 120 м^3 .

18.8.9. Автоматизированная система управления комплексом термоупрочнения арматуры

В данной работе участие В. Г. Лисиенко выражалось в руководстве и консультациях аспирантской работы Д.В. Завгороднева, сотрудника ОАО «НИИ металлургической теплотехники-ВНИИМТ», связанной с разработкой автоматизации устройства термоупрочнения [18.276]. В работе активное участие принимали сотрудники

ОАО «НИИМТ-ВНИИМТ», ООО «Уралсофт», ООО «Северсталь», Ю.И. Ляпунов, К.Ю. Эйсмوند, Д.В. Завгороднев, В.В. Кучмасов, В.И. Соловьев, С.В. Коржавин и др.

Работа является частью весьма актуального направления, развиваемого в ООО «ВНИИМТ» под руководством Ю.И. Ляпунова и К.Ю. Эйсмонта по разработке и внедрению способов и устройств по так называемому «термоупрочнению проката в потоке».

В частности, в потоке стана 350 сортопрокатного цеха ОАО «Северсталь» был введен в эксплуатацию комплекс устройства термоупрочнения (УТУ) арматуры, разработанный ОАО «НИИМТ-ВНИИМТ» при участии КО «ВНИИМЕТМАШ» (г. Санкт-Петербург) и ООО «Уралсофт» (г. Екатеринбург). Устройство предназначено для обеспечения требований класса At500c по СТО АСЧМ7-93 при производстве арматуры периодического профиля №№ 25–40 из рядовых марок сталей.

В состав комплекса входит собственно установка термоупрочнения, состоящая из 7 секций водяного охлаждения и распределительного узла систем водо- и воздухоснабжения секций, тянущие ролики (трайб-аппарат) и автономная насосная станция высокого давления. Все части комплекса имеют собственные системы управления. Секции охлаждения вводятся в линию стана только при прокатке термоупрочняемой арматуры, при этом секция № 1 устанавливается на место клетки № 13, а секции № № 7-1 и 7-2 установлены за стрелкой параллельно линии отводящих рольгангов. Тянущие ролики устанавливаются между секцией № 6 и стрелкой.

Для гарантии стабильности механических свойств при термоупрочнении арматуры с прокатного нагрева необходимо обеспечение с высокой точностью температуры конца охлаждения и скорости изменения температуры в процессе ускоренного охлаждения раската. С учетом высоких скоростей и темпа прокатки, а также отсутствия штатной единицы оператора УТУ, весь комплекс указанных требований к устройству, необходимых для его эффективного функционирования, при ручной режиме управления выполнить достаточно сложно. В связи с тем, что УТУ установлено в технологической линии прокатного стана, и, следовательно, работает в ритме с чистовой группой клеток прокатного стана, необходимо постоянно получать информацию о диаметре прутка, скорости прокатки, технологии термоупрочнения (режимам охлаждения) и др. Для гарантированно-

620

го обеспечения технологических требований при термоупрочнении арматурного проката устройство оборудовано автоматизированной системой управления (АСУ УТУ).

Автоматизированная система управления (АСУ) УТУ предназначена для решения следующих задач:

- реализации технологии охлаждения в зависимости от сортамента производимого проката;
- обеспечения эффективного функционирования УТУ путем автоматизированного выполнения в реальном масштабе времени функций управления технологическим процессом, определения и поддержания режимов охлаждения, определением температурного состояния раскатов после охлаждения их в УТУ и введения в случае необходимости корректив на режимы охлаждения;
- контроля, визуализации и хранения параметров технологического процесса и состояния технологического оборудования;
- информационного сопровождения во взаимодействии со смежными системами АСУ.

Система характеризуется большим количеством входных сигналов с объекта и выходных управляющих сигналов на исполнительные механизмы (более 750 переменных), а также достаточно большим объемом работ по обработке входной информации и сложностью координации работы УТУ в целом. Кроме того, некоторые функции могут выполняться практически независимо от других. Малое фактическое время процесса охлаждения раската в УТУ (5–8 с) накладывает жесткие временные ограничения на выполнение функций АСУ, не позволяющие реализовать все указанные функциональные подсистемы в одной управляющей вычислительной машине (УВМ), в связи с чем применена двухуровневая структура построения. На нижнем уровне реализуются только функции измерения, контроля и непосредственного управления по заданиям верхнего уровня или оператора УТУ, промежуточная обработка получаемой информации, обмен с верхним уровнем. На верхнем уровне реализуются функции оперативного диспетчерского управления работой автоматизированного технического комплекса (АТК) в целом, расчета заданий для подсистем нижнего уровня, отображения информации для обслуживающего персонала, сигнализации и хранения информации (см. рис. 18.173).

Функции АТК нижнего уровня выполняют: программируемый контроллер Simatic S7-400, осуществляющий выполнение задач обработки сигналов контрольно-измерительного комплекса, диагностики, управления, передачи данных в одиночном или групповом режиме и связь со смежными системами АСУ; многофункциональные станции распределенного ввода-вывода Simatic ET200M, осуществляющие непосредственную связь с исполнительными механизмами (ИМ) и датчиками. Обмен информацией между контроллером и периферийными устройствами (ET200M) осуществляется по сети PROFIBUS-DP.

Функции АТК верхнего уровня АСУ, к которым относятся: подготовка с помощью расчета по математической модели процесса охлаждения заданий подсистемам нижнего уровня, визуализация, разработка и отладка новых технологических режимов, сбор в процессе пуско-наладочных и исследовательских работ расширенного объема информации о технологическом процессе, ее обработка и архивирование, – реализованы на промышленном компьютере PC 870 Vox пульта управления оператора (ПУ).

Связь верхнего и нижнего уровней осуществляется PROFIBUS-DP. Сеть PROFIBUS-DP также обеспечивает связь АСУ УТУ со смежными и вышестоящими системами АСУ.

На нижнем уровне АСУ УТУ выполняются следующие задачи:

- измерение температуры раската до и после ускоренного охлаждения;
- слежение за положением раската на участке «последняя работающая клеть – УТУ – транспортный рольганг холодильника»;
- измерение и настройка расходов воды;
- включение/отключение подачи воды на охлаждение воздуха и воды на отсекку охладителя в секциях;
- диагностика УТУ и сигнализация при аварийных ситуациях;
- обмен информацией с верхним уровнем и со смежными АСУ.

На верхнем уровне АСУ УТУ выполняются следующие задачи.

- функционирование математической модели процесса охлаждения в режиме реального времени, корректировка параметров процесса;
- визуализация технологического процесса;
- формирование команд управления для систем нижнего уровня;

- обработка и хранение информации о работе УТУ и охлаждении раскатов;
- формирование базы данных технологических режимов охлаждения.

АСУ УТУ является смежной по отношению к АСУ прокатки и АСУ насосной, и низшей, в перспективе, по отношению к системе управления производством проката (АСУПП) цеха (предусмотрена возможность посредством сетевой связи на уровне контроллеров получать от АСУПП информацию по сортаменту раскатов, подающихся на обработку в УТУ).

Через АСУ прокатки производится обмен информацией о скорости прокатки в 12 клетки и скорости транспортировки тянущими роликами (трайб-аппаратом).

Пульт управления оператора оборудован промышленным компьютером, на котором отображаются параметра процесса, информация о текущем состоянии оборудования УТУ. В основном окне «Общий вид» монитора отображается информация о выбранном режиме охлаждения и результатах охлаждения, а именно:

- сведения о раскате;
- номера работающих секций (помеченные цветом);
- фактическая скорость движения раската;
- температура металла до и после охлаждения в УТУ;
- значения максимальной температуры раската до и после охлаждения в УТУ;
- показания датчиков наличия металла.

Информация о заданных и фактических расходах воды по секциям обработке оборудования УТУ, об изменении температуры во времени и по длине раската была представлена еще в нескольких окнах с вложенными графиками и таблицами [18.276].

Установленный на панели оператора пакет прикладных программ математической модели процесса охлаждения дает возможность по заданным исходным данным прогнозировать параметры режимов ускоренного охлаждения прутков после прокатки.

На дисплей ПУ оператора выводятся следующие результаты расчета:

- технологическая скорость транспортировки арматуры через УТУ, м/с;

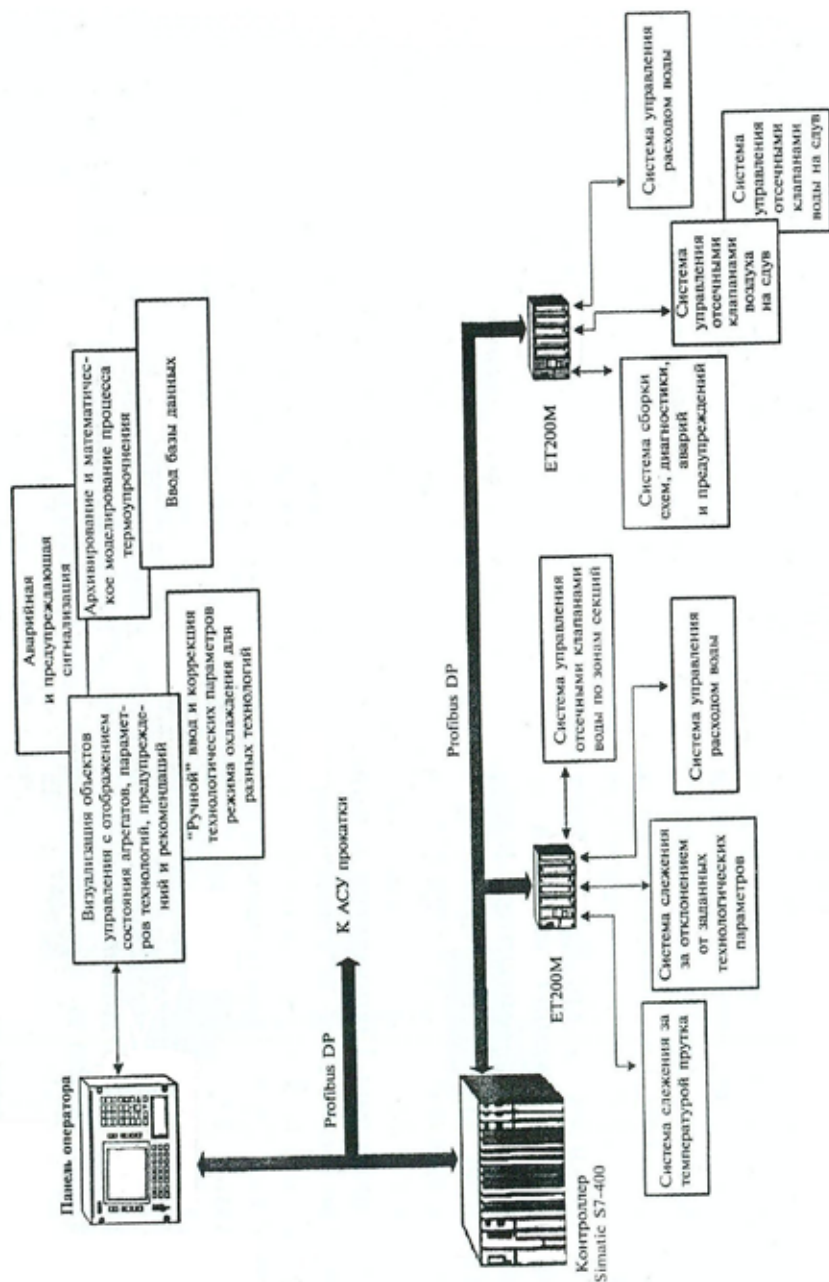


Рис. 18.173. Структура управления АТК

- скорость охлаждения раската, К/с.
- температура поверхности раската: в зоне визирования пирометра перед УТУ, находящегося в непосредственной близости к последней работающей клетки, в зоне визирования пирометра за УТУ, расположенного на расстоянии 30 метров от последней секции устройства.

АСУ УТУ может функционировать в следующих режимах:

- автоматизированном прямого управления (далее – режим прямого управления), при котором комплекс технических средств (КТС) АСУ УТУ вырабатывает и реализует управляющие воздействия непосредственно на исполнительные механизмы технологического объекта управления, и отображает их на мониторе ПУ оператора. Информация, необходимая для выработки управляющих воздействий, поступает в АСУ УТУ от смежных АСУ или вводится оператором посредством системной клавиатуры. В этом режиме независимо друг от друга могут функционировать как задача управления оборудованием УТУ, так и задача, которая рассчитывает режим охлаждения раската. В режиме прямого управления предложенные значения расходов передаются как задания в контроллер автоматически.
- автоматизированном операторном (или пуско-наладочном) режиме (далее – режим операторного управления), при котором КТС АСУ УТУ представляет оператору УТУ информацию о технологическом объекте управления, а выбор и реализацию управляющих воздействий осуществляет оператор. В операторном режиме работы оператор имеет возможность передать как задания в контроллер либо определенные математической моделью значения расходов, либо собственные значения этих параметров.

Режимы прямого управления и операторный подразделяются, в свою очередь, на подготовительную и рабочую стадии. В регламент подготовительной стадии включаются все операции, связанные с настройкой УТУ для обработки определенной партии металла; к регламенту рабочей стадии относится управление собственно процессом охлаждения. Одновременное осуществление подготовительной и рабочей стадии для любого из режимов.

В АСУ использованы стандартные программные продукты, предназначенные для аппаратуры верхнего и нижнего уровня Step7 V5.3, WinCC V6.0, система управления базами данных FoxPro. Математическая модель процесса охлаждения реализована на языке программирования C++ и активизируется посредством функций, выполняемых WinCC.

До начала обработки партии в АСУ УТУ от АСУ прокатки поступает информация о раскате, конечной температуре охлаждения и т. д. В зависимости от технологических требований АСУ УТУ производит выбор количества и номера включаемых секций, определение расходов воды по секциям. Расчет проводится по алгоритму, реализующему математическую модель охлаждения, разработанному в ОАО «НИИМТ-ВНИИМТ». Определение режимов ускоренного охлаждения раскатов основано на решении одномерного дифференциального уравнения теплопроводности в граничных условиях II и III рода. Граничные условия задаются по экспериментально установленным в процессе пуско-наладочных работ зависимостям плотности теплового потока от плотности орошения при охлаждении. При оперативном управлении основной параметр регулирования – это расход воды в задействованных в процессе термоупрочнения в секциях УТУ.

После выхода раската из УТУ производится измерение фактической температуры конца охлаждения. Если на пяти прошедших подряд прутках зафиксировано отклонение фактической температуры от требуемой по технологии АСУ УТУ рассчитывает и вводит поправку расходов воды в задействованных секциях УТУ. По завершении процесса термоупрочнения раската в базе данных ИС формируется файл – паспорт обработки, включающий всю необходимую информацию о процессе.

У технологического персонала имеется возможность воспользоваться математической моделью охлаждения раската, функционирующей в режиме «СОВЕТ». Этот вариант работы математической модели предназначен для обучения персонала, проведения предварительных оценочных расчетов и позволяет рассчитать параметры термообработки термообработки для ускоренного охлаждения, охлаждения подката, закалки и экспериментальных режимов охлаждения. Исходные данные для расчета задаются технологическим персоналом, результаты расчета выводятся на экран дисплея.

Таким образом, в результате данной работы была разработана и введена в эксплуатацию автоматизированная система управления устройством термоупрочнения арматуры в потоке стана 350 сорто-прокатного цеха ОАО «Северсталь». АСУ УТУ предназначена для осуществления контроля и управления процессом термоупрочнения раскатов и управления технологическим оборудованием УТУ.

АС УТУ имеет двухуровневую структуру построения, каждый уровень которой выполняет строго определенные функции. АСУ УТУ может функционировать как в режиме автоматизированного прямого управления, при котором оператор вмешивается в управление только в исключительных случаях, так и в автоматизированном операторном режиме, при котором часть задач выполняется автоматически, а часть – под управлением оператора. Для наиболее гибкого управления процессом перечень выполняемых АСУ задач может меняться по выбору оператора.

Автономная АСУ УТУ интегрирована в общую систему управления производственным процессом линии стана и обменивается информацией выше и нижестоящими и смежными АСУ.

Визуализация параметров технологического процесса и состояния оборудования УТУ позволяет контролировать и управлять как устройством в целом, так и каждым исполнительным механизмом.

Математическая модель, функционирующая на верхнем уровне АСУ УТУ, позволяет реализовывать режимы охлаждения для каждой партии раската индивидуально в режиме реального времени и моделировать в режиме «СОВЕТ» процесс охлаждения по произвольно задаваемым условиям.

Описание системы определения температуры прутка, что очень важно для процессов термообработки, приведено в гл. 19.

18.8.10. Диагностика появления брака в процессе изготовления топливных таблеток

Данная работа проведена под руководством Б.Б. Зобнина, с участием авторов (в части разработки математической модели нагрева) и А.Г. Трощенко (Уральский государственный горный университет (УГГУ), УрФУ и Свердловский НИЦ химического машиностроения [18.277]).

Отмечено, что в России работал 31 энергоблок на 10 АЭС. В период до 2020 г. планируется рост выработки электроэнергии атомных станций – в 1,8–2,1 раза.

Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов (твэлы) снаряжены топливными таблетками. Выполнение технических требований к изготовлению топливных таблеток для твэлов в условиях их массового производства ставит проблему эффективного управления процессом изготовления этих таблеток и, прежде всего, установкой сушки и спекания, в значительной мере определяющей появление брака спеченных таблеток.

Сложность физико-химических явлений, протекающих в установке спекания, делает актуальной проблему моделирования и диагностики изучаемого объекта для решения задач оптимизации технологии спекания таблеток ядерного топлива.

Типичная технология изготовления таблеток из исходного порошка включает в себя следующие технологические операции: усреднение – грануляция – прессование – сушка – спекание – шлифование.

Процесс изготовления таблеток начинается с операции усреднения состава партии исходного порошка для стабилизации свойств таблеток.

Перед прессованием для обеспечения текучести исходного порошка и постоянства насыпной массы, необходимых для равномерной дозировки и равномерного заполнения продуктом пресс-форм прессов, проводят его грануляцию путем перемешивания с органической связкой, предварительного уплотнения и механического измельчения.

Сущность процесса прессования порошка заключается в уменьшении его начального объема обжатием. Объем порошкового тела при прессовании изменяется в результате заполнения пустот между частицами за счет их смещения и пластической деформации.

Спрессованные (сырые) таблетки поступают на термообработку в печах сушки и спекания.

Сушка предназначена для удаления и улавливания с использованием ловушек продуктов разложения пластификатора (стеарата цинка или натрия) и возгонов (адсорбированных газов, выделяющихся из топлива).

Операция спекания осуществляется для придания таблеткам окончательной прочности, компактности и обеспечения требуемой плотности.

Наиболее часто встречающиеся виды брака при спекании: скрытый расслой, коробление и искажение формы, пережог, недопекание, появление корочки, вспучивание, диффузионная пористость.

Построение математической модели формирования брака топливных таблеток основано на максимальном использовании информации, содержащейся как в аналитических моделях, описывающих деформации таблеток в процессе их изготовления, так и в отчетах о результатах статистического контроля качества таблеток.

В качестве возможных причин появления брака спеченных таблеток были рассмотрены деформации таблетки, происходящие после прессования при снятии давления и выталкивании ее из прессформы, а также при термической усадке в процессах сушки и спекания.

Методика моделирования включала в себя:

- обоснование комплекса параметров, определяющих появления брака таблеток;
- построение «каркаса» модели, т. е. ее физической основы, которое сводится к описанию системы отношений, характеризующих исследуемый объект, в частности, законов сохранения и кинетики процессов;
- исследование вероятностного аспекта формирования некондиционных таблеток.

Показано, что основными факторами, влияющими на качество таблеток, являются: размеры частиц исходного порошка; температура и время термообработки; состав атмосферы в объеме спекания; степень чистоты и давление газа, наполняющего объем печи; состав и количество примесей; размеры таблеток.

В работе рассматривался случай, когда основной вклад в упругое продольное расширение таблетки после прессования вносят снимаемые с таблетки нормальные напряжения σ_n .

В качестве физической основы описания динамики объемных изменений; происходящих в таблетке после прессования и связанных с упругим последствием, использовано уравнение Кельвина-Фойгта с постоянными коэффициентами:

$$\varepsilon' + T_{\text{посл}}^{-1} \varepsilon = \sigma / \eta_k, \quad (18.387)$$

где $\varepsilon = (\varepsilon_r + \varepsilon_z + \varepsilon_t)/3$, $\sigma = (\sigma_r + \sigma_z + \sigma_t)/3$;

$\varepsilon_{rzt}, \sigma_{rzt}$ – деформации и напряжения по координатам соответственно;

$T_{\text{посл}} = \eta_k / \psi_k$ – время последствия, равное времени, при котором деформация изменится в ε раз; η_k – объемная вязкость упругого последствия; ψ_k – объемный модуль упругого последствия.

Вероятностный аспект формирования некондиционных таблеток исследован с использованием модели изменения состояний таблеток, использующей математический аппарат теории марковских цепей (рис. 18.174).

Модель построена при следующих допущениях.

Любая таблетка может находиться в одном из четырех состояний: 1 – норма; 2 – необнаруженный дефект в таблетке; 3 – обнаруженный дефект в таблетке; 4 – брак.

Под действием управляющих воздействий или дестабилизирующих факторов система будет переходить из одного состояния в другое с определенными интенсивностями.

Полагали также, что в исходном состоянии 95 % таблеток являются кондиционными, 5 % таблеток имеют обнаруженные и необнаруженные дефекты, а некондиционные таблетки отсутствуют.

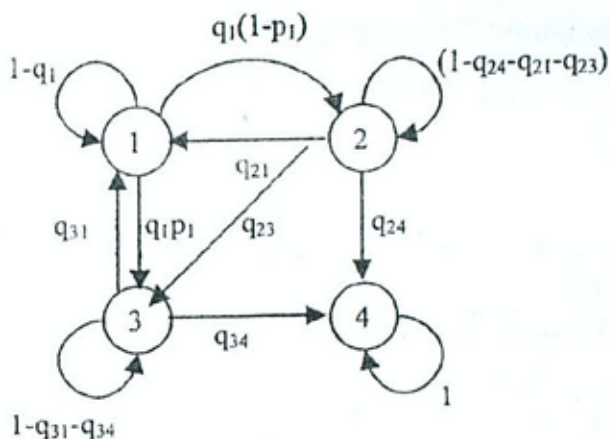


Рис. 18.174. Диаграмма переходов между состояниями таблеток

Адекватность модельного процесса исходному понималась в том смысле, что пары (S_{i-1}, S_i) соседних состояний вдоль траекторий модельного и исходного процессов распределены одинаково.

Под влиянием управляющих воздействий или дестабилизирующих факторов система будет переходить из одного состояния в другое с определенными интенсивностями.

Полагали, что переходная вероятность процесса имеет глубину 1, т. е. могут быть определены вероятности реализации на k -м шаге состояния S_j при условии, что на шаге $k-1$ реализовалось состояние S_{i-1} .

Оценки переходных вероятностей найдены по результатам статистического контроля качества таблеток.

Интенсивность q_{ij} перехода из состояния S_i в состояние S_j , отличное от S_i определяется следующим образом. За малый интервал времени Δt процесс, который находится в момент k в состоянии S_i , может совершить переход в состояние S_j с вероятностью q_{ij} . Вероятность двух и более переходов за время Δt равняется нулю.

Были использованы следующие обозначения:

q_i – вероятность появления дефекта в течение дискретного интервала времени Δt ;

$(1 - q_i)$ – вероятность сохранения исходного состояния в течение дискретного интервала времени Δt ;

p_i – вероятность обнаружения дефекта в течение дискретного интереса времени Δt ;

q_{su} – вероятность перехода из состояния s в состояние u и течение дискретного интервала времени; $s = 2$ или 3 , $u = 1, 3$ или 4 ;

$q_{44} = 1$, т. е. попав в состояние «брак» таблетка остается в нем до конца технологического цикла (состояние 4 является поглощающим).

Вероятности q_{21} и q_{31} соответствуют «залечиванию» дефектов в i -й стадии технологического процесса.

В соответствии с диаграммой переходов были составлены рекуррентные уравнения для распределения вероятностей сохранения определенного состояния в следующий момент времени $(k + 1)$:

$$\begin{aligned} P(k+1, 1) &= (1 - q_1) \cdot p(k, 1) + q_{21} \cdot p(k, 2) + q_{31} \cdot p(k, 3) - q_1 \cdot p(k) \times \\ &\quad \times p(k, 1) - q_1 (1 - p(k)) \cdot p(k, 1); \\ P(k+1, 2) &= q_1 (1 - p(k)) \cdot p(k, 1) + (1 - q_{24} - q_{21} - q_{23}) \cdot p(k, 2) - \\ &\quad - q_{21} \times p(k, 2) - q_{23} \cdot p(k, 2) - q_{24} p(k, 2); \quad (18.388) \\ P(k+1, 3) &= q_1 \cdot p(k) \cdot p(k, 1) + q_{23} \cdot p(k, 2) + (1 - q_{31} - q_{34}) \times \\ &\quad \times p(k, 3) - q_{31} \cdot p(k, 3) - q_{34} \times p(k, 3); \\ P(k+1, 4) &= 1 - (p(k, 2) + p(k, 3) + p(k, 4)). \end{aligned}$$

Были введены понятия адекватного и неадекватного технологических режимов спекания. При неадекватности технологического режима дисперсионным и реологическим свойствам порошка доля брака таблеток закономерно возрастает.

Состояние таблеток для адекватного и неадекватного технологических режимов характерно для трех технологических фаз:

- выдержка таблеток после прессования;
- период подъема температуры при спекании;
- выдержка постоянной температуры при спекании.

При заданном распределении начальных состояний и значениях вероятностей перехода брак таблеток достигает 8,9 %. При уменьшении интервалов времени выдержки таблеток после прессования по сравнению со временем релаксации и времени нагрева таблеток в печи сушки (последнее приводит к увеличению темпа роста температуры таблеток более 110 °С/ч) процент брака увеличивается до 18,5 %.

В качестве физической основы температурного описания процесса спекания топливных таблеток использовано обобщенное зональное конечно-разностное уравнение теплопередачи и теплового баланса для непрозрачной, объемной j -й зоны системы из $(m + n)$ зон, которое имеет вид [18.1]:

$$\sum_{i=1}^{m+n-1} A_{ij}^{\Sigma} T_i^4 - A_j^{\Sigma} T_j^4 \sum_{i=1}^{ij} g_{ij} T_i - g_j T_j + Q_j = 0, \quad (18.389)$$

где A_{ij}^{Σ} , A_j^{Σ} – селективные коэффициенты радиационного обмена, Вт/К⁴;

A_{ij}^{Σ} – коэффициент, учитывающий передачу лучистой энергии от зоны i к зоне j ;

A_j^{Σ} – коэффициент, учитывающий передачу лучистой энергии от зоны j на все остальные зоны;

g_{ij} – коэффициент конвективного обмена теплом или переноса тепла массой между зонами i и j , Вт/К;

g_j – коэффициент конвективного обмена теплом или переноса тепла массой от зоны j ко всем соседним зонам, Вт/К;

i – число зон, соседних с зоной j и контактирующих с ней через поверхность;

Q_j – внутреннее тепловыделение в зоне j и тепло, подводимое в зону извне.

В установке сушки и спекания теплообмен происходит в системах из трех тел: нагреваемый материал – печная среда – стенки.

Для учета нагрева таблеток, помещенных в «лодочки», использовали градиентный закон теплопроводности Фурье. При этом к системе $m + n$ уравнений для результирующих тепловых потоков (18.389) добавляется p уравнений, соответствующих p зонам движущейся лодочки.

Для j -й зоны уравнение принимает вид, характерный для регулярного режима нагрева [18.1]:

$$W_{\text{лм}j} T_{\text{лм}i} - W_{\text{лм}j} T_{\text{лм}j} + (T_{\text{пл}j} - T_{\text{лм}j}) / \left(\delta_{\text{лод}} / \lambda_{\text{лод}} + \psi \frac{\gamma_{\text{мат}}}{\lambda_{\text{мат}}} \right) + Q_{\text{лм}j} + Q_{\text{п}j} = 0, \quad (18.390)$$

где $W_{\text{лм}ij}$, $W_{\text{лм}j}$ – теплоемкости лодочки, входящей в зону j и выходящей из зоны j , Вт/К;

$T_{\text{лм}i}$, $T_{\text{лм}j}$ – температуры лодочки, входящей в зону j и выходящей из зоны j , средние по массе, К;

$Q_{\text{лм}j}$ – свободной слагаемое, включающее внутреннее тепловыделение в лодочке (тепло фазовых превращений), Вт;

$Q_{\text{п}j}$ – результирующий тепловой поток через поверхность лодочки в j -й зоне, Вт;

ψ – коэффициент, зависящий от формы нагреваемого тела ($\psi = 1/3$ – плита, $\psi = 1/4$ – цилиндр, $\psi = 1/5$ – шар);

$\delta_{\text{лод}}$ – толщина лодочки, м;

$\lambda_{\text{лод}}$ – теплопроводность лодочки, Вт/(м·К);

$\gamma_{\text{мат}}$, $\lambda_{\text{мат}}$ – характерный размер и коэффициент теплопроводности спекаемых таблеток, м и Вт/(м·К).

Совместное использование уравнений (18.389) и (18.390) позволяет учитывать в рамках зонального метода и градиентную составляющую переноса, хотя и в упрощенном виде, анализировать нагрев движущихся лодочек и определять в процессе нагрева как температуру поверхности лодочки, так и ее среднюю температуру по массе.

По результатам имитационного моделирования получены изолинии функций отклика, связывающих плотность спеченных таблеток и долю дефектных таблеток с крупностью зерен порошка и температурой спекания (см. рис. 18.175).

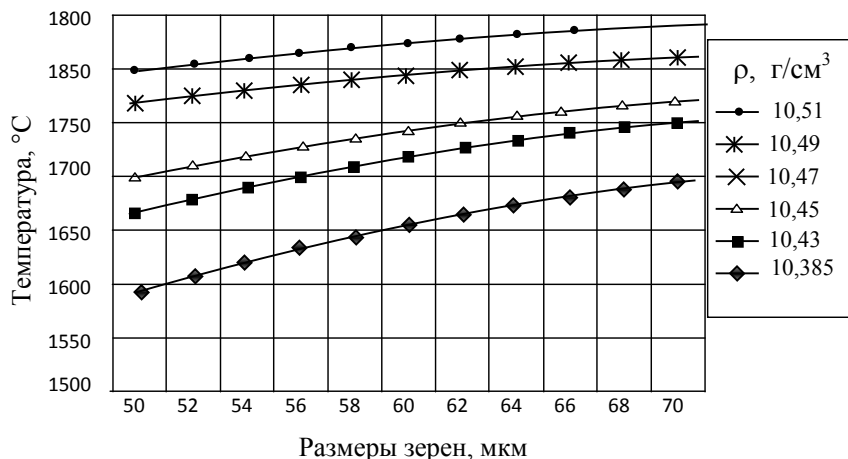


Рис. 18.175. Изолинии плотности ρ спеченных таблеток при вариациях крупности зерен порошка и температуры спекания

Комплекс разработанных математических моделей позволил решить задачу диагностики для минимизации доли брака топливных таблеток при стабилизации плотности таблеток на заданном уровне и был реализован для использования НИЦ химического машиностроения.

18.8.11. Струйно-факельные воздушнонагреватели, система автоматизации и температурная стабилизация вентиляционного воздуха в шахтах

В Т. 3, Ч. 1 данного издания были отмечены основные особенности установок прямого нагрева воздуха приточных систем вентиляции (ПНВ) и представлен опыт применения ПНВ в шахте [18.3].

Этот опыт непрерывно развивался и уже 11 шахт оснащены установками ПНВ и эти работы продолжают. Эти работы с участием авторов проводятся ПНП «Газ-инжиниринг» под руководством Ю.К. Маликова, также с участием Г.К. Маликова, Д.Л. Лобанова, А.В. Саплина, Е.М. Шлеймовича, А.С. Перина, А.А. Титаева и др.

В данном параграфе основное внимание уделено системам автоматизации ПНВ, конечно, тесно связанным с конструкциями струйно-факельных смесительных нагревателей [18.3; 18.278–18.282].

Разработка и применение струйно-факельных смесительных нагревателей

Отметим, что снабжение металлургических предприятий, в частности, предприятий цветной металлургии сырьевыми рудными материалами (медная, алюминиевая подотрасли, добыча руд благородных металлов и т. д.) связано часто с эксплуатацией глубоких шахт. При этом в холодные зимние периоды, что характерно для отечественной металлургии, имеет место промерзание воздухоподающих стволов шахт. Для обеспечения нормальной и безаварийной работы шахт применяют подогрев вентиляционного воздуха, подаваемого для проветривания шахт, в калориферах с используемым для обогрева воздуха теплофикатом. Однако, как показывает практика, в особенно холодное время года возможны частые размораживания калориферов, что приводит к возникновению перебоев и опасных ситуаций в работе шахт. Подача теплоносителя в калориферы связана с эксплуатацией энергетических установок (котельных, ТЭЦ и т. д.), наличием часто достаточно протяженных трубопроводов, что также не гарантирует бесперебойную подачу теплофиката в холодное время года.

В общем случае калориферы представляют собой устройства (конструкция которых может быть самой разной) для подогрева воздуха в системах воздушного отопления, вентиляции и сушила. Водяные калориферы представляют собой систему трубок или каналов, внутри которых движется горячая вода в качестве теплоносителя, нагревающего омывающий воздушный поток (по существу – это рекуперативный теплообменник).

Согласно требованиям Правил безопасности [18.283] поступающий в шахту воздух в зимнее время должен подогреваться до температуры не ниже $+2^{\circ}\text{C}$. Как отмечалось, традиционный способ подогрева воздуха осуществляется с использованием горячей воды или пара котельных (водяные или паровые калориферы). Такие установки обладают большой тепловой инерцией и низким коэффициентом полезного действия (не более 65 %) из-за многоступенчатой передачи теплоты от топки котла к нагреваемому воздуху. Потери тепла при транспортировании теплоносителя и перемещении нагретого воздуха в водяных калориферах, как показывает их обследование, составляют 30–50 %. Наличие же в системе легко замерзающего

теплоносителя (водяные калориферы) и возможности конденсации пара (паровые калориферы) делает теплоснабжение ненадежным и аварийно опасным. Помимо этого, для сооружения подобных систем теплоснабжения требуются значительные капитальные затраты, особенно для воздушных стволов, далеко удаленных от центральной котельной. Отметим также, что и сами котельные являются источниками вредных выбросов в окружающую среду.

Поэтому при реконструкции систем подачи и подогрева воздуха предпочтение отдается технологическим схемам со сравнительно низкими эксплуатационными затратами, минимальными потерями тепловой энергии и высокой эффективностью использования топлива на основе газовых теплогенераторов [18.284]. В частности, в зарубежной практике распространение получили системы прямого нагрева воздуха (ПНВ) – воздухонагреватели смесительного типа, в которых сжигание природного газа происходит непосредственно в потоке нагреваемого воздуха [18.285; 18.286]. При этом в смесительном воздухонагревателе теплота от продуктов сгорания к нагреваемому воздуху передается путем их смешения в определенном соотношении в зависимости от требуемой температуры смеси с продуктами сгорания.

Принципиальные преимущества прямого нагрева воздуха очевидны: 100 % использование теплоты (всё химическое тепло сжигаемого топлива передается нагреваемому воздуху); за счет меньшей металлоемкости смесительные воздухонагреватели дешевле рекуперативных, характеризуются большим диапазоном мощности и отсутствием дымохода; не требуется специальная камера сгорания, дополнительная футеровка, дымосос; низкие затраты на установку и эксплуатацию (рамповый горелочный блок легко встраивается в существующие каналы приточно-вытяжной вентиляции). Особое значение, прежде всего для районов с суровыми климатическими условиями, имеет отсутствие в системе легко замерзающего теплоносителя (в отличие от традиционного использования водяных калориферов). Это обеспечивает высокую надежность теплоснабжения, так как устраняет опасность замерзания воды. Однако широкое практическое применение в России смесительных воздухоподогревателей для отопления и вентиляции помещений, в которых возможно пребывание людей (в том числе шахт), ограничивается,

прежде всего, органами Роспотребнадзора из-за опасности неблагоприятного воздействия на здоровье персонала продуктов сгорания газа. Согласно отечественным нормативным документам [18.287] качество сжигания газа и количество воздуха, используемого для смешивания с продуктами сгорания газа, должны обеспечивать образование смеси, в которой концентрация вредных веществ в выходном патрубке не превышает 30 % ПДК в воздухе рабочей зоны производственных помещений. Таким образом, именно указанную концентрацию вредных веществ следует рассматривать в качестве лимитирующего фактора при практическом внедрении систем ПНВ.

В мировой практике, начиная с работы Д. Сурлея [18.285], всеобщее распространение, как наиболее надежные и безопасные (в том числе и по образованию вредных продуктов сгорания природного газа) получили струйно-диффузионные горелочные устройства с перфорированным уголковым стабилизатором (рис. 18.176).

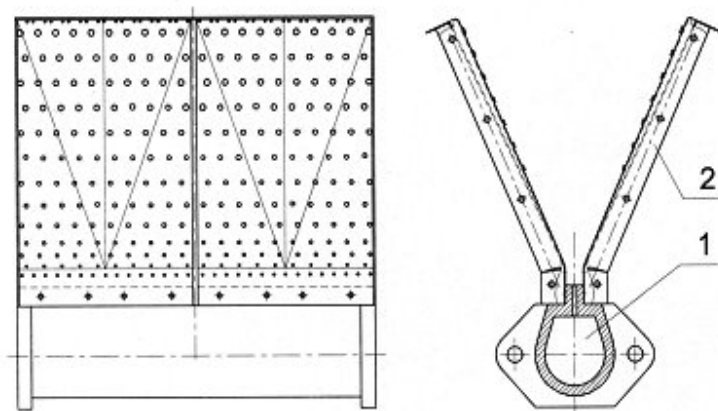


Рис. 18.176. Струйно-диффузионная горелка с центральным подводом газа:
1 – газовый коллектор с центральными соплами;
2 – перфорированный уголковый стабилизатор

Проанализированы возможности применения указанных горелочных устройств различных производителей для проветривания шахт согласно отечественным санитарным нормам. При этом в качестве основных загрязнителей при сжигании природного газа в смесительных воздухо-нагревателях рассмотрены оксиды азота и оксид углерода. Для условий проветривания шахт при учете остро-

направленного действия суммы этих веществ принято использовать понятие условного оксида углерода, массовая концентрация которого выражается в виде:

$$[\text{CO}_x] = 4 [\text{NO}_x] + [\text{CO}], \quad (18.391)$$

где $[\text{CO}]$ – массовая концентрация оксида углерода, мг/м^3 ; $[\text{NO}_x]$ – массовая концентрация оксидов азота в пересчете на NO_2 , мг/м^3 .

По требованиям безопасной работы концентрация условного оксида углерода в приточном воздухе не должна превышать 30 % ПДК в воздухе рабочей зоны:

$$[\text{CO}_x] < 0,3 \cdot 20 = 6 \text{ мг/м}^3. \quad (18.392)$$

В качестве расчетного интервала температуры подогрева воздуха, например, для проветривания шахт Уральского региона можно принять величину 44 °С (от –41 °С до + 3 °С). Для подогрева на 44 °С одного м^3 воздуха при стандартных условиях ($t = 20$ °С, $P = 760$ мм рт. ст.) требуется 0,0533 МДж. Это количество теплоты соответствует низшей теплоте сгорания природного газа, поскольку расчет показывает, что относительная влажность воздуха, подаваемого в помещение через установку прямого нагрева, будет всегда ниже влажности наружного воздуха. В связи с тем, что нормирование выбросов проводится, как правило, на высшую рабочую теплоту сгорания природного газа (которая на 11 % больше), значение 0,0533 следует заменить на 0,059. С учетом соотношения (18.392), получено требование к выбросам для горелочного устройства прямого нагрева воздуха для проветривания шахт:

$$[\text{CO}_x] < 6/0,059 = 102 \text{ мг/МДж}. \quad (18.393)$$

В табл. 18.33 приведены данные по выбросам от струйно-диффузионных горелочных устройств с уголкового перфорированным стабилизатором различных производителей.

Таким образом, становится очевидным, что струйно-диффузионные горелочные устройства указанной конструкции, исходя из отечественных санитарных норм для рабочей зоны, не могут быть использованы в качестве единственного источника нагрева воздуха, т. е. по одноступенчатой схеме.

Таблица 18.33

Значения выбросов вредных веществ при работе на природном газе струйно-диффузионных горелок с уголковым перфорированным стабилизатором

Горелка		Выброс вредных веществ, мг/МДж		
Тип	Фирма	CO	NO _x	CO _x *
AIRFLO NP-1	MAXON, США	50	35	190
AIRFLO RG-IV	MAXON, США	45	25	145
AH-MA	Eclipse Combustion, США	80	30	200
STARWEIN	SARGI, Франция	60	40	220
* В пересчете на условный оксид углерода $[CO_x] = [CO] + 4[NO_x]$				

На предприятиях горнорудной промышленности России для вентиляции шахт системы ПНВ до недавнего времени вообще не применялись. Первая в России система ПНВ для проветривания шахт была запроектирована специалистами ООО «Газ-Инжиниринг» и УрФУ на базе воздухонагревателя РГ 1000 КМТ (аналог AIRFLO RG-IV) по двухступенчатой схеме, т. е. в дополнение к существующим водяным калориферам, и была введена в эксплуатацию в 2002 г. на шахте «Северопесчанская» Богословского рудоуправления [18.3; 18.278; 18.288]. При этом при использовании системы ПНВ в качестве пикового нагревателя удалось решить крайне сложную для условий северного Урала инженерную задачу утилизации тепловой энергии, выделяемой в компрессорах при производстве сжатого воздуха, на собственные технологические нужды горнорудного предприятия.

Для расширения области применения систем ПНВ на других горнодобывающих предприятиях и возможности полного отказа от водяных калориферов требовалась существенная доработка горелочных устройств с целью значительного снижения выбросов вредных веществ и дополнительного снижения расходов топлива. Для решения этой сложной задачи был использован описанный ранее отечественный опыт по разработке и применению струйно-факельного отопления [18.2; 18.3; 18.20; 18.24; 18.25; 18.247; 18.289], при котором организовано горение высокоскоростных струй заранее подготовленной газозоудшной смеси в виде системы близко расположенных гомогенных факелов. Экспериментальные и численные исследования струйно-факельного отопления (СФО) позволили до-

биться очень хороших результатов по снижению вредных выбросов, в частности, оксидов азота. При этом было установлено, что в печах СФО одновременно реализуется сразу несколько известных способов подавления эмиссии оксидов азота: снижение температуры горения (в результате выноса горения в рабочий объем печи и интенсивной теплоотдачи к нагреваемому металлу); увеличение кратности циркуляции (большое число струй и их высокая скорость); исключение локально перегретых зон газовой среды в рабочем объеме печи (вследствие предварительного перемешивания и отсутствия горелочных камней). Выяснилось также, что оксиды азота образуются в основном не по термическому, а по быстрому механизму, их эмиссия близка к минимально возможной и практически не зависит от температуры воздуха для горения (см. рис. 18.177).

Важно отметить, что струйно-факельное отопление может осуществляться и при больших значениях коэффициентов избытка воздуха, по существу, вблизи нижнего концентрационного предела воспламенения – при $\alpha = 1,5\text{--}1,7$. Это позволило в разработанном на принципах СФО смесительном воздухонагревателе РГ 2000 М, в отличие от предыдущих конструкций, организовать струйно-факельный процесс, происходящий при температурах $1150\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени ($\alpha = 1,5\text{--}1,7$).

В смесительном воздухонагревателе РГ 2000 М происходит сгорание предварительно перемешанной смеси природного газа с большим избытком воздуха. Процесс осуществляется при температуре $1150\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени. При этом реализация полного сгорания при сравнительно низких температурах и больших избытках воздуха позволила получить очень низкий, полностью соответствующий санитарным нормам, выход вредных веществ без использования катализаторов и впрыска пара, как это, например, реализовано для камер сгорания ГТУ. Это и было подтверждено специально проведенными исследованиями, выполненными специалистами Роспотребнадзора и Екатеринбургского медицинского научного центра (ЕМНЦ) профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий [18.278]. Общая схема функционирования системы ПНВ для обогрева воздухоподающих стволов и вентиляции шахты со смесительными воздухонагревателями РГ 2000 М, работающими на предвари-

тельно подготовленных бедных газовоздушных смесях, представлена на рис. 18.178. Тепловая мощность каждого нагревателя составляет 4,0 МВт. Температура воздуха, подаваемого в ствол шахты, регулируется подачей природного газа в смесительное устройство и камеру сгорания. При этом дополнительно устанавливается регулятор соотношения «природный газ» – «воздух для горелки». Установка ПВН предназначена для подогрева подаваемого в подземный рудник свежего воздуха до 37 °С (или меньше), исходя из важнейшего условия, что температура подаваемого воздуха в ствол составляет 2–3 °С при расчетной наружной температуре – 35 °С.

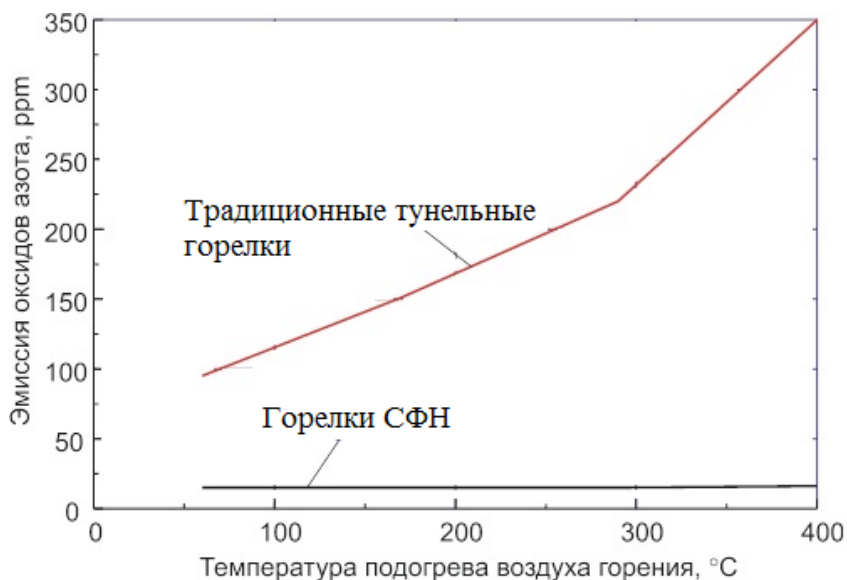


Рис. 18.177. Зависимость эмиссии NO_x от температуры подогрева воздуха для различных горелочных устройств

Система ПВН автоматически запускается при отрицательных температурах наружного воздуха и автоматически отключается как только температура наружного воздуха становится равной 0 °С или выше.

За счет действия данной системы автоматики, например, для условий Учалинского района Башкортостана рассчитанная продолжительность отопительного сезона сокращается до 171 суток. В случае типового процесса недогрева приточного воздуха в водяном кало-

рифере подогрев не может быть прерван на несколько часов или суток при сравнительно кратковременном потеплении и снижении температуры наружного воздуха. Поэтому отопительный сезон для традиционной схемы включает и период межсезонного отопления и при этом общая продолжительность работы отопительного оборудования составляет 210 суток, т. е. больше на 23 %. Это обстоятельство является дополнительным источником экономии отопительных ресурсов.

В системе ПНВ практически все тепло природного газа расходуется на подогрев приточного воздуха.

В эксплуатационных промышленных и отопительных агрегатах потери теплотой отходящих газов составляют 15–20 %, что обуславливает их низкий тепловой КПД.

В отечественной практике лишь единичное применение нашли конденсационные теплоутилизаторы, которые позволяют повысить КПД газовых котельных на 7–12 %.

Данная система ПНВ применена на ряде шахт по добыче руд цветных металлов Уральского региона. При этом удалось соблюсти все необходимые санитарные нормы при подаче подогретого вентиляционного дополнительных подогревателей другого типа. На январь 2015 г. системы ПНВ на базе струйно-факельных смесительных подогревателей РГ 2000 М были внедрены на 16 стволах шахт с большим экономическим и экологическим эффектом, и эта работа продолжается. При этом следует учесть, что в случае использования традиционных калориферов котельные и ТЭЦ выделяют в атмосферу значительное количество оксидов азота и углерода, что полностью исключено в случае ПНВ.

Практика использования установок ПНВ показала возможность стабильного обеспечения требуемой температуры подогрева вентиляционного воздуха. При этом демонстрируется также высокий уровень безопасности установленных систем ПНВ, что подтверждают результаты лабораторного контроля, выполненного специалистами Роспотребнадзора и ЕМНЦ. Установлено, что реализованные в РГ 2000 М концентрационно-температурные режимы окисления метана обеспечивают практически полное подавление механизмов образования таких вредных веществ как бенз(а)перен. В заметных количествах в продуктах сгорания природного газа после РГ 2000 М можно обнаружить только оксиды азота и оксид углерода. Данные исследований [18.278] показывают, что при со-

блюдении проектных режимов эксплуатации системы ПНВ во все периоды отопительного сезона (межсезонье, умеренные морозы, самый холодный месяц) концентрации вредных веществ: оксида азота, диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода, бенз(а)пирена, твердого аэрозоля, – в подаваемом в шахту воздухе не превышают существующего регламента. По сравнению с традиционной схемой (центральная котельная – теплосеть – водяной калорифер) обеспечивается экономия природного газа в 3 раза, снижение выбросов оксида углерода в 30 раз, а оксидов азота в 200 раз.

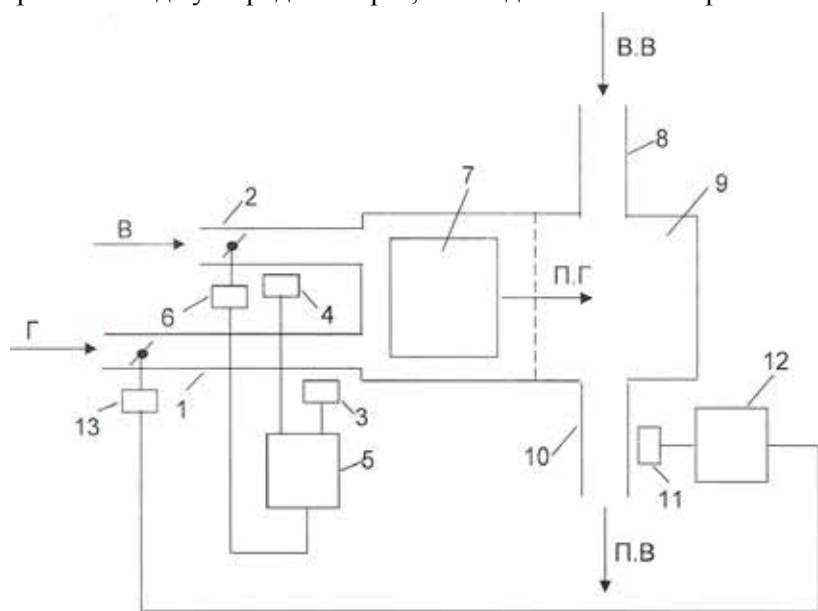


Рис. 18.178. Схема функционирования системы ПНВ со смесительным воздушнонагревателем, с предварительно перемешанной газозвушной смесью и струйно-факельной системой горения (РГ 2000 М):

1 – трубопровод подачи газа; 2 – трубопровод подачи воздуха; 3 – датчик расхода газа; 4 – датчик расхода воздуха; 5 – регулятор соотношения «газ-воздух»; 6 – исполнительный механизм расхода воздуха; 7 – смесительное устройство и камера сгорания; 8 – трубопровод подачи холодного вентиляционного воздуха; 9 – камера смешения продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом; 10 – трубопровод подогретого воздуха; 11 – датчик температуры подогретого воздуха; 12 – регулятор расхода подогретого воздуха; 13 – исполнительный механизм расхода природного газа; В – воздух для горения; Г – природный газ;

П.Г – продукты сгорания; В.В – холодный вентиляционный воздух;

П.В – подогретый вентиляционный воздух в ствол шахты

Как отмечалось, были известны системы и устройства для вентиляции с использованием калорифера для нагрева приточного воздуха в шахты (согласно требованиям Правил безопасности до температуры не ниже $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в зимних условиях). При этом используются воздухонагреватели (калориферы), работающие с использованием нагретой воды котельных. Однако недостатком этих устройств является низкий КПД, как правило, не превышающий 65 %, требуются значительные капитальные затраты, установки обладают большой тепловой инерцией и, что особенно важно, имеют склонность к замерзанию теплоносителя в условиях суровых зим, что приводит к отключению вентиляции и аварийному состоянию шахт.

Были известны также так называемые огневые калориферы (газовые теплогенераторы), теплоносителем в которых являются продукты сгорания природного газа [18.284]. Однако недостатком этих устройств являются большие капитальные затраты, значительная тепловая инерция, возможность перегорания трубок теплоносителя, сложность автоматического регулирования теплопроизводительности установки.

Задачей создания данной системы являлось обеспечение бесперебойной, безаварийной работы вентиляционной установки шахт в зимних условиях, снижение капитальных затрат, уменьшение тепловой инерционности, повышение КПД установки, снижение расхода энергии при незначительном (ниже ПДК) содержании токсичных газов в подогретом воздухе.

Эта задача была решена таким образом, что система ПНВ вентиляции шахт при прямом газовом нагреве, включающем вентиляторы и трубопроводы подачи холодного вентиляционного воздуха и датчик температуры холодного воздуха, отличается тем, что она включает трубопроводы подачи природного газа и воздуха для горения газа, блок сгорания природного газа, блок смешивания продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом, при этом это соотношение более пяти, блок автоматического запуска и отключения устройства, прибор зажигания газа, датчики обнаружения пламени и блок отсечки подачи газа при погасании пламени, датчики: расходов природного газа, воздуха для горения и холодного вентиляционного воздуха, разрежения в блоке смешивания, газового анализа и температуры подогретого воздуха, регулятор темпера-

туры подогретого воздуха, блок отсечки подачи газа по содержанию вредных примесей в подогретом воздухе, регулятор соотношения «газ - воздух для горения», узел подачи подогретого воздуха в вентиляционный ствол шахты, вентиляционные ворота регулирования подачи подогретого воздуха в подэтажи шахты, при этом блоки сгорания природного газа и смешивания продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом, узел подачи подогретого воздуха в вентиляционный ствол шахты, вентиляционные ворота регулирования подачи подогретого воздуха в подземные этажи шахты последовательно связаны между собой, блоки контроля давления газа в газопроводе и регулятор температуры подогретого воздуха связаны с трубопроводом подачи природного газа, блок расхода воздуха для горения, блок автоматического запуска и отключения устройства связан с датчиком температуры холодного воздуха, трубопроводом подачи газа и прибором зажигания газа связаны с трубопроводом воздуха для горения, блок разрежения в камере смешения и блок отсечки подачи газа при погасании пламени связаны с блоком смешивания природного газа с воздухом для горения, блоки газового анализа, содержания вредных веществ в подогретом воздухе, температура подогретого воздуха и датчики обнаружения пламени связаны с блоком сжигания природного газа в смеси с воздухом для горения и регулятор соотношения «газ - воздух для горения» (см. рис. 18.179).

Таким образом, важнейшей особенностью данной системы является необходимое поддержание двух соотношений: 1) природный газ – воздух для горения и 2) продукты сгорания - холодный вентиляционный воздух.

Первое соотношение при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 1,3-1,5$ обеспечивает работу блока горения при сниженной температуре 1150-1250 °С, при которой эмиссия оксидов азота становится минимальной. При большем коэффициенте расхода воздуха горение газа выходит за пределы распространения пламени и возникает срыв пламени, при меньшем коэффициенте расхода – увеличивается температура продуктов сгорания и соответственно эмиссия оксидов азота. Второе соотношение должно обеспечить, с одной стороны, требуемую температуру подогрева воздуха, подаваемого в шахту – + (1–2) °С, а, с другой – разбавление продуктов сгорания и снижение концентрации вредных газов – СО и NO_x в подогретом воздухе. При снижении этого соотношения менее пяти увеличива-

ется концентрация вредных выбросов, при чрезмерном увеличении – снижается требуемая температура подогрева воздуха.

Таким образом, важнейшим элементом данной системы является смешивание продуктов сгорания природного газа с холодным вентиляционным воздухом при поддержании соотношения более пяти. При меньшем значении этого соотношения увеличивается, содержание вредных веществ в продуктах сгорания (оксиды углерода и азота, метана). При большем значении – содержание природного газа выходит за концентрационные пределы воспламенения и возможен срыв и погашение пламени, что нарушает работу блока сжигания и приводит к образованию взрывоопасной смеси. Блоки автоматического контроля важнейших параметров работы устройства – контроля пламени, давления газа в газопроводе, расходов воздуха, разрежения в камере смешения, газового анализа и температуры подогретого воздуха обеспечивают нормальную, безаварийную работу устройства.

Как отмечалось, при наружной температуре подаваемого воздуха до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечен подогрев воздуха на $37\text{--}38\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при этом температура подогретого воздуха, подаваемого в ствол шахты, составит $+(2\text{--}3)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При этом обеспечивается высокий КПД нагрева воздуха, так как практически вся теплота сгорания природного газа используется для подогрева приточного воздуха.

Проведенные анализы показали, что результирующая степень загрязнения приточного воздуха в ствол шахты не превышает 25 % ПДК, что отвечает требованиям § 450 ПБ 03-553-03, согласно которому содержание токсичных газов не должно превышать 30 % ПДК. Температура подогретого воздуха в пределах $+(2\text{--}3)\text{ }^{\circ}\text{C}$ поддерживается регулятором температуры путем регулирования расхода природного газа, при этом регулятор соотношения «газ – воздух для горения» обеспечивает подачу в камеру горения требуемого количества воздуха. Автоматический запуск устройства происходит при температуре окружающего воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, и при превышении этой температуры устройство отключается. Предусмотрены необходимые условия безопасности работы установки – так осечка-подача природного газа происходит при погасании пламени в блоке горения и при превышении концентрации вредных газов (CO , NO_x) выше 30 % от соответствующих ПДК. Разводка подогретого воздуха по подэтажам шахты обеспечена соответствующими вентиляционными воротами, установленными после ствола шахты на входе в подэтажи шахты.

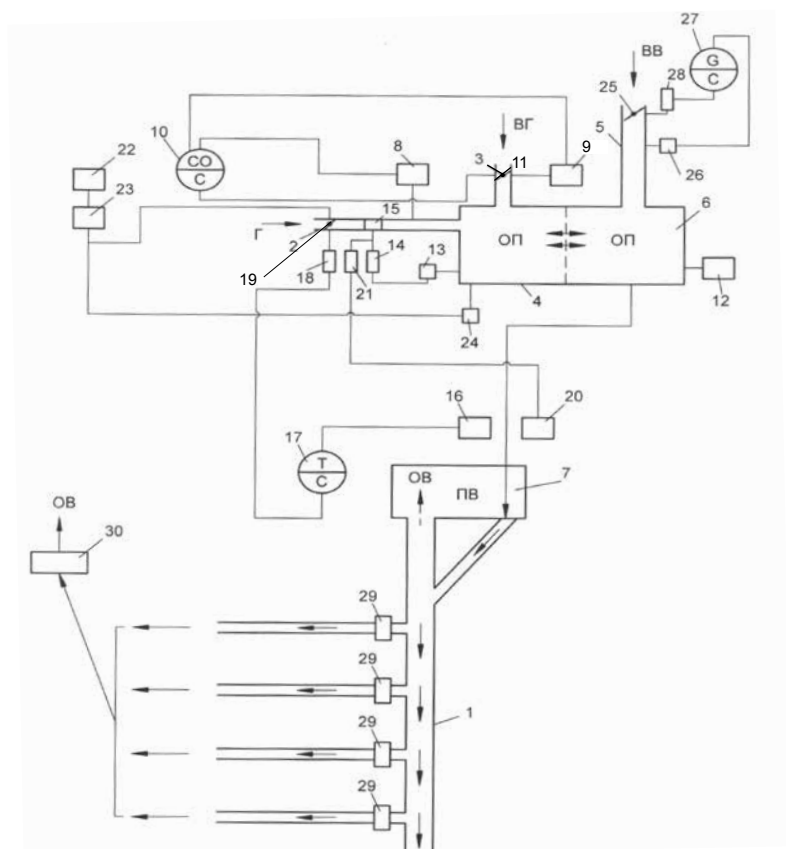


Рис. 18.179. Схема систем ПНВ для вентиляции шахты при прямом нагреве воздуха:

1 – ствол шахты; 2 – трубопровод подачи природного газа; 3 – трубопровод подачи воздуха для горения; 4 – блок сгорания газа; 5 – трубопровод подачи холодного вентиляционного воздуха; 6 – блок смешивания продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом; 7 – блок подачи подогретого воздуха в вентиляционный ствол шахты; 8 – датчик расхода газа; 9 – датчик расхода воздуха; 10 – регулятор соотношения газ-воздух; 11 – регулирующая заслонка; 12 – датчик разрежения в камере смешения; 13 – датчик обнаружения пламени; 14 – электрический отсечной механизм; 15 – отсечной механизм подогретого воздуха; 16 – датчик температуры подогретого воздуха; 17 – регулятор температуры подогретого воздуха; 18 – электрический двигатель; 19 – регулирующий газовый клапан; 20 – газоанализатор; 21 – отсечной электрический механизм; 22 – датчик температуры наружного воздуха; 23 – блок автоматического запуска и отключения устройства; 24 – прибор зажигания и горения газа; 25 – регулирующая дроссельная заслонка холодного вентиляционного воздуха; 26 – датчик его расхода; 27 – регулятор его расхода; 28 – исполнительный механизм; 29 – вентиляционные ворота подэтажей шахты; 30 – вывод воздуха из шахты; г – газ; ВГ – воздух для горения; ОП – область перемешивания продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом; ПВ – подогретый воздух; ОВ – отвод воздуха из шахты; С – регулятор; СО – соотношение; Т – температура; ВВ – вентиляционный воздух

Достоинством данной системы является практически безынерционность – возможность его гибкого включения при отрицательных температурах и отключения при повышении температуры наружного воздуха.

Система работает следующим образом (см. рис. 18.179). В блок сгорания газа 4 подается по трубопроводам 2 и 3 газ и воздух от вентилятора; расходы газа и воздуха определяются датчиками 8 и 9. Соотношение «газ - воздух» устанавливается регулятором 10 путем воздействия на регулируемую дроссельную заслонку 11. Сгорание газа в смеси с воздухом осуществляется в блоке сгорания газа 4. При этом регулятор соотношения 10 обеспечивает коэффициент расхода воздуха при сгорании газа $\alpha = 1,3-1,5$ для обеспечения температуры образующихся продуктов сгорания 1150-1250 °С. Наличие горения и отсутствие срыва пламени контролируется датчиком обнаружения пламени 13, и при наличии срыва пламени срабатывает электрический отсечной механизм 14 и отсечной клапан 15. Подогретый воздух в холодный вентиляционный воздух подается по трубопроводу 5, его расход определяется датчиком 26 и регулируется с помощью регулятора 27 и исполнительного механизма 28.

В блоке 6 продукты сгорания смешиваются с холодным вентиляционным воздухом, при этом его температура повышается до + (2–3) °С. Разрежение в блоке 6 контролируется датчиком 12. Фактически блоки 4 и 6 пространственно разделены лишь условно, горение газа и смешивание продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом происходит синхронно. Температура подогретого воздуха определяется датчиком 16, поддержание этой температуры в пределах + (2–3) °С осуществляется регулятором 17 с помощью регулирующего органа 18 и регулирующего клапана 19.

Соотношение расхода природного газа (и соответственно продуктов сгорания) и холодного вентиляционного воздуха, определяемых датчиками 8, 9 и 26 поддерживается на уровне более 500, что позволяет снизить до требуемого уровня содержание вредных газов в смеси продуктов сгорания с холодным вентиляционным воздухом при одновременном обеспечении необходимой температуры смеси + (2-3) °С. Содержание вредных газов в подогретом воздухе (CO , NO_x) определяется газоанализатором 20, при превышении их содержания выше 30 % ПДК срабатывает электрический отсечной механизм 21 и отсечной клапан 15, перекрывая подачу газа. Устройство

запускается автоматически при показаниях датчика температуры наружного воздуха 22 менее 0°C , при этом используется регулятор 23, газовый клапан 19 и прибор зажигания газа 24. Отключение также осуществляется автоматически при температуре наружного воздуха выше 0°C при использовании датчика 22, регулятора 23 и газового клапана 19. Разводка подогретого воздуха по подэтажам шахты осуществляется при помощи вентиляционных ворот 29, воздухоотведение из шахты происходит через канал 30.

Пример реализации

Система вентиляции при прямом газовом нагреве воздуха (система ПВН) была использована для подогрева подаваемого в вентиляционный ствол рудной шахты воздуха до $+ (2-3)^{\circ}\text{C}$. Проектная производительность шахты по добыче руды – 400 тыс. т в год.

При этом установлен воздухонагреватель, в котором происходит сгорание предварительно перемешанной смеси природного газа с воздухом при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,3-1,5$, процесс осуществляется при температуре $1150-1250^{\circ}\text{C}$ вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени. Система автоматически обеспечивает поддержание заданной температуры.

Применены четыре воздухонагревателя, каждый из которых имеет тепловую мощность 4,0 МВт.

Общее подаваемое количество подогретого воздуха $1100,0 \text{ м}^3/\text{мин}$. Максимальный расход природного газа $780 \text{ м}^3/\text{ч}$ при расчетной температуре наружного воздуха -35°C . Распределение подогретого воздуха по четырем подэтажам шахты, $\text{м}^3/\text{мин}$: 300, 9100, 600 и 300, соответственно.

Установка автоматически запускается при температуре наружного воздуха 0°C и соответственно отключается при более высокой температуре.

Результирующая степень загрязнения приточного воздуха не превышает 25 % ПДК, т. е. содержание вредных веществ (CO и NO_x) не превышает 25 % от ПДК. В частности, содержание $\text{CO} = 3,1 \text{ мг}/\text{м}^3$ (ПДК = $20 \text{ мг}/\text{м}^3$); $\text{NO}_x = 0,128 \text{ мг}/\text{м}^3$ (ПДК = $5,0 \text{ мг}/\text{м}^3$); $\text{NO}_2 = 0,19 \text{ мг}/\text{м}^3$ (ПДК = $2 \text{ мг}/\text{м}^3$).

В результате по сравнению с традиционной схемой вентиляции (центральная котельная – теплотрасса – водяной калорифер) получены следующие преимущества:

- низкая металлоемкость: отпала необходимость строительства громоздких водяных калориферов и прокладки многокилометровых тепловых сетей;

- мобильность: блочное исполнение калориферной позволяет перемещать ее с одного ствола на другой по мере отработки рудных тел;

- устойчивость, надежность и безопасность: полностью устраняется опасность размораживания водяных калориферов. По техническим характеристикам (давление газа и теплоносителя, температура теплоносителя, площадь и этажность здания, необходимого для размещения оборудования) установка ПНВ не относится к особо опасным производственным объектам и, в соответствии с гл. 1, п. 6д 9, 10л Положения об организации и проведении государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий (с изменениями от 29.12.07, от 16.02.08, от 07.11.08 утвержденного Постановлением правительства РФ от 5 марта 2007 г. № 145), не подлежит рассмотрению Главгосэкспертизой России вплоть до внесения изменений и дополнений или выхода нового положения;

- экономичность: удельный расход топлива на подогрев приточного воздуха (среднее значение за отопительный период) снизился в 3,3 раза;

- экологичность: выбросы вредных веществ в атмосферу в расчете на единицу полезно использованной теплоты снизились по СО – в 32 раза, по NO_x - в 202 раза.

Таким образом, применение системы обеспечивает надежную и устойчивую работу вентиляционной системы шахт в условиях низкой температуры наружного воздуха при точном поддержании требуемой температуры подогретого воздуха, снижает металлоемкость вентиляционной системы и удельный расход топлива при полном соблюдении экологических требований по содержанию вредных веществ.

Еще раз отметим широкое внедрение данной системы ПНВ с большими указанными выше эффектами на шахтах цветной металлургии (уже более 16 шахт) и эта работа продолжается.

Рассматривается возможность их использования на подобных шахтах в районе Норильска.

18.8.12. Система удаленного мониторинга и управления

На современном уровне в области печестроения и энергостроения произошли столь значительные изменения, которые иначе как

650

технически революционные, пожалуй, не назовешь. Эти изменения коснулись как требований к технологиям нагрева, так и собственно конструкции, а также технического обеспечения. В частности, требования к техническому обеспечению АСУ ТП печей и энергоустановок предусматривает оснащение высоконадежными контроллерами, создание удобных интерфейсных средств контроля нагрева и поиска неисправностей, а также создание систем дистанционного мониторинга и управления. В данном параграфе приведен оригинальный опыт создания систем удаленного мониторинга и управления для печных агрегатов.

Работа проводилась под руководством Ю.К. Маликова и авторов с участием И.Ю. Медведева, Е.Ю. Шахтарина, К.А. Сурганова, А.А. Титаева, А.В. Васильева и др., а также и сотрудников предприятия.

Данный опыт основан на проведении модернизации термической камерной печи (названной «печью XXI века») с целью повышения качества термообработки заготовок, в том числе путем оснащения печи самыми современными средствами автоматизации. Опыт реконструкции печи осящен в Т. 2, кн. 1 и 2 данного издания [18.2; 18.3]. В данном параграфе остановимся более детально на передовом опыте разработки и внедрения системы удаленного мониторинга и управления применительно к данному агрегату [18.291].

Таким образом, как отмечалось, была создана система удаленной настройки и управления процессом нагрева. Существует ряд причин, позволяющих считать дистанционный контроль существенным и определяющим элементом современной АСУ ТП. Во-первых, это повсеместное существование корпоративных сетей на предприятиях и создание системы дистанционного контроля технологического процесса снимает вопросы сопряжения специализированного оборудования с корпоративными сетями и передачу в них данных о протекании технологического процесса; во-вторых, для обслуживания специализированного оборудования, например ПЛК компьютер фирмы Siemens, необходимы специалисты высокой квалификации, прошедшие специальный курс обучения, и удаленный контроль за процессом решает задачу быстрого поиска неисправностей в работе оборудования и даже дистанционного перезапуска системы в случае

недостаточной квалификации персонала; и в-третьих, многообразие печных технологий очень велико, и дистанционное управление позволяет в «кабинетных» условиях развивать и совершенствовать алгоритмы управления.

К сожалению, даже существование корпоративной сети на предприятии с выходом в Интернет не всегда решает задачу удаленного контроля над процессом, поскольку наряду с вопросами сопряжения оборудования с этими сетями возникает проблема передачи данных из самой сети. Кроме того, относительно высокая стоимость кабельных систем сопряжения, их монтажа, а так же ненулевая вероятность аварий и дополнительные затраты на их содержание часто заставляет отказаться от использования корпоративной сети предприятия. Применение существующих коммутируемых телефонных линий так же не обеспечивает достаточной надежности, поскольку проблема прямого дозвона и качество связи не гарантируют надежную и своевременную передачу данных. Как правило, приходится организовывать сторонний канал передачи данных от объекта управления в центральный офис разработчика системы и обратно. В таком случае логично использовать системы передачи по радиоканалу, однако использование радиомодемов с выделенной частотой тоже имеет свои недостатки: во-первых, существует необходимость лицензирования частоты, а во-вторых, для получения большой зоны охвата территории потребуется установка репитеров [18.292].

В настоящее время наиболее актуально в качестве такого канала использовать системы сотовой связи, предоставляющие ряд технологий для передачи данных. Подобного рода схемы обсуждались в течение многих лет. Однако широкое распространение технологий передачи данных замедлялось из-за проблем с покрытием, стоимостью, эксплуатационными качествами и безопасным удаленным доступом в систему. Наиболее популярный стандарт сотовой связи GSM обеспечивает достоверность, надежность и достаточную скорость при работе с информацией, а разнообразие режимов связи позволяет оптимизировать систему удаленного мониторинга и управления по стоимости эксплуатации канала связи. Кроме GSM, для передачи данных возможно использование стандарта CDMA2000, который обеспечивает большую по сравнению с GSM скорость

передачи, однако доступность этого стандарта меньше из-за пока малой территории радиопокрытия. Разнообразие режимов связи в сетях стандарта GSM позволяет оптимизировать систему удаленного мониторинга и управления по стоимости эксплуатации канала связи. Сегодня сотовые операторы стандарта GSM предлагают три варианта связи: при помощи коротких sms-сообщений, в режиме GSM и в режиме GPRS (рис. 18.180).

<p>■ Служба коротких сообщений SMS (Short Message Service)</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> простота использования</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> низкая стоимость</p> <p>✗ отсутствие гарантий быстрой доставки</p> <p>✗ ограничение по длине (не более 160 знаков в режиме транслитерации)</p>
<p>■ режим GSM</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> максимальный приоритет</p> <p>✗ низкая скорость передачи данных</p> <p>✗ повременная оплата</p>
<p>■ технология пакетной передачи данных GPRS</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> относительно высокая скорость</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> низкая стоимость</p> <p>✗ скорость передачи определяется загрузкой сети</p>

Рис. 18.180. Способы передачи данных в сетях GSM

Специалистами ООО «Газ-инжиниринг» совместно с НИИ ПЭА УрФУ были в рамках проекта реконструкции термической печи реализованы две системы удалённого мониторинга управления, использующие в качестве канала передачи данных GPRS:

1. Система с созданием канала передачи данных по требованию.
2. Система с постоянно действующим каналом связи.

В качестве GPRS модема в обоих случаях использовался сотовый модем Fargo Maestro 100 фирмы Fargo Telecom. Это терминальное устройство в металлическом корпусе с внешним блоком питания. Ядром модема является модуль Quick фирмы Wavecom.



Рис. 18.181. Схема системы удаленного управления с созданием канала передачи данных по требованию

В первом случае (рис. 18.181, см. рис. 18.182) GPRS модем подключен «напрямую» к компьютеру с установленной SCADA-системой. В этом случае нерационально создавать постоянно действующий канал связи во избежание превышения допустимой нагрузки на SCADA-компьютер, возникающей, например, вследствие распределенных Internet-атак. Для установки связи используется терминал передачи команд, в качестве которого может выступать обычный сотовый телефон. Команда посылается в виде sms-сообщения на номер, закрепленный за GPRS модемом. Далее, с помощью сети передатчиков провайдера GSM, данное специализированное sms-сообщение поступает в память GPRS модема и обрабатывается программным приложением GSMControl, так же установленным в компьютере со SCADA-системой. GSMControl, созданный специалистами «Газ-инжиниринг», по результатам обработки сообщения выполняет команды, переданные в телесообщения, и, в том числе, может установить связь с сетью Internet по протоколу GPRS.

Затем возможно подключение консоли оператора в качестве клиента к SCADA-системе посредством программ управления удаленным рабочим столом. После выполнения всех необходимых действий, GSMControl разрывает связь. Следует отметить, что в сетях GSM при использовании протокола передачи данных GPRS в реальных условиях следует рассчитывать на пропускную способность 1–5 кб/с. В этих условиях отрисовка удаленных графических консолей в оперативном режиме возможна лишь в случае применения протокола прикладного уровня, посредством которого удаленное приложение-сервер передает атрибуты объектов, например, тип объекта и координаты объекта на экране, а локальная управляющая программа-клиент воспроизводит графическую консоль, с которой работает оператор.

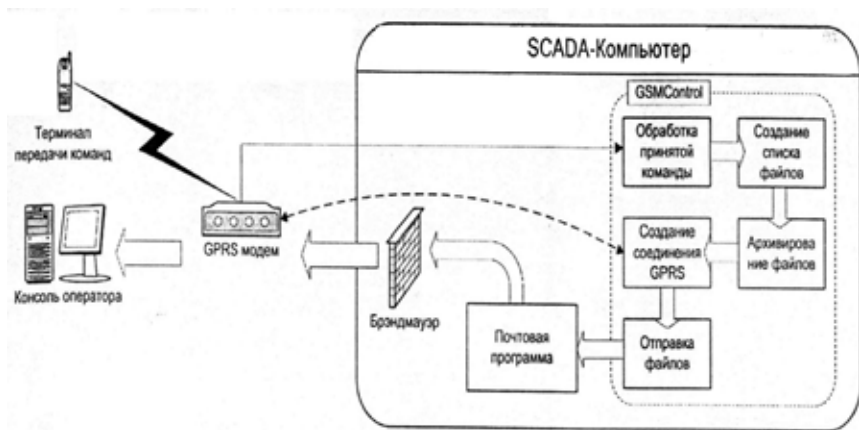


Рис. 18.182. Схема автоматизированного мониторинга печного агрегата с передачей команд с помощью SMS и отправкой данных по каналам электронной почты

Для минимизации трафика разработана развитая система команд, передаваемых в телеуправляющего SMS-сообщения, способных обеспечить практически полный мониторинг системы без использования графических консолей. Кроме этого, создана система безопасности, предусматривающая установку брандмауэра для фильтрации входящего трафика из сети Internet и использующая для ограничения доступа заранее заданный список телефонов, работающих в качестве терминалов передачи команд.

Поскольку быстрая доставка SMS-сообщения не гарантируется оператором сотовой связи, то для оперативной работы реализована возможность создания канала передачи управляющей информации в режиме GSM. В этом случае, терминал передачи команд устанавливает связь с GPRS модемом в режиме «точка - точка» и, пользуясь этим каналом, передает команды управления напрямую приложению GSMControl согласно специализированному протоколу. При этом результаты выполнения команд, включающие данные телеметрии, передаются по завершении сеанса связи с помощью GPRS.

В связи с общей нестабильностью систем, работающих под управлением Windows, была создана усовершенствованная схема удаленного управления с возможностью организации постоянного канала передачи данных.

Рядом с Windows-компьютером, выполняющим приложение SCADA, устанавливается управляющий Linux-компьютер с подключенным GPRS модемом. Между ними организуется высокоскоростная сетевая связь по технологии Ethernet. Таким образом, компьютер с установленной SCADA-системой управляет ПЛК, Linux-компьютер управляет Windows-компьютером, оператор через канал сотовой связи GPRS управляет Linux-компьютером (рис. 18.183).

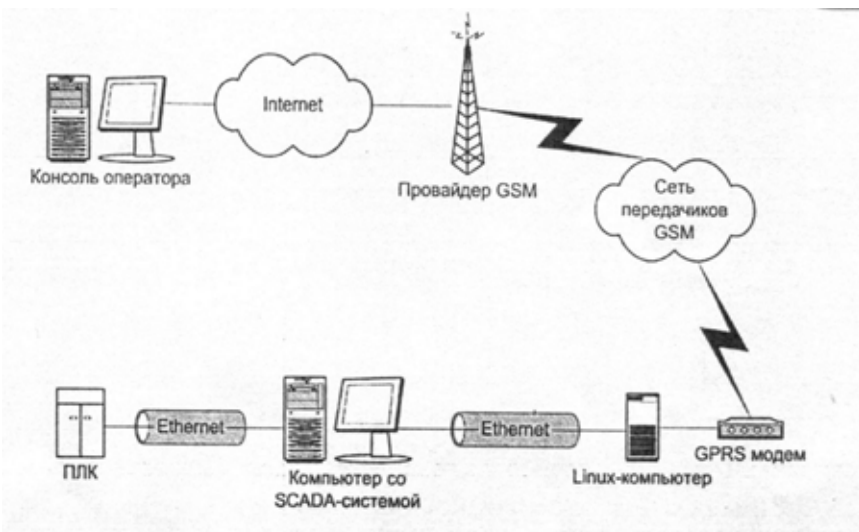


Рис. 18.183. Схема системы удаленного управления с постоянно действующим каналом связи

В этом случае снимается проблема допустимой нагрузки, поскольку задачи фильтрации трафика и отражения атак целиком переносятся на управляющий компьютер в определенной степени замещает собой оператора, который следит за работой приложения и восстанавливает компьютер со SCADA-системой в случае возникновения аварийной ситуации. Управляющий компьютер нагружается необходимыми семантиками в виде программ и сценариев, которые активируются удаленно, и, например, в случае разрушения файловой системы Windows, оператор командой может запустить процесс восстановления системы с резервной копии. Управляющий компьютер выполняется в виде безвентиляторного одноплатного компьютера с пониженным энергопотреблением и флеш-диском, т. е. без механических компонент. При возникновении возможности увеличить пропускную способность канала связи между локальной и удаленной системами данное решение легко масштабируется и может охватить функции удаленного администрирования с выносом графической консоли.

Таким образом, для многих задач диспетчеризации и автоматизации применение GPRS модемов является наиболее экономичным решением. К тому же у большинства сотовых операторов наблюдается тенденция к снижению цен на услуги GPRS. В дальнейшем для этих же целей возможно использование стандартов CDMA2000 или EDGE (Enhanced Data Rates for Global Evolution), который, по предварительным оценкам, будет вытеснять GPRS. Обе технологии позволяют передавать данные с большей скоростью и надежностью, но пока не слишком распространены в России.

Можно говорить о следующей трехступенчатой системе управления, представленной на рис. 18.184, которая с нашей точки зрения, может являться характерным примером современных технологий управления. При этом дистанционный контроль является важным элементом современной АСУ ТП, обеспечивающей:

- передачу данных о протекании технологического процесса непосредственно разработчикам;
- быстрый поиск неисправностей;
- развитие и совершенствование алгоритмов управления.



Рис. 18.184. Схема трех ступеней АСУ ТП

Например, реализация проекта (в рамках общей схемы реконструкции термической печи – система импульсного отклонения, с прямым цифровым управлением, использование волокнистых огнеупорных материалов, автоматизированная схема стабилизации давления в рабочем пространстве печи) позволяла более оперативно, в том числе в режиме удаленного доступа проводить и пуско-наладочные работы и после реализации проекта проводить промышленные испытания и обеспечивать авторский надзор в рамках гарантийного срока эксплуатации печи без частых командировок.

Отметим, что данный вариант удаленного доступа строился на базе существующей структуры АСУ ТП. Второй вариант данной системы был использован на Качканарском ГОКе и по сравнению с первым вариантом отличался повышенной надежностью, которая достигалась введением в верхний уровень АСУ ТП дополнительного управляющего компьютера, отдельно реализующего функции удаленного мониторинга и управления. Еще раз подчеркнем, что обе системы реализовали удаленный контроль и управление агрегатами с использованием каналов передачи данных стандарта GSM.

18.8.13. Практические внедренческие разработки АСУ нагревом

В данном параграфе в дополнение к предыдущим данным приведены материалы по непосредственному использованию АСУ на-

гревом на промышленных предприятиях. При этом следует подчеркнуть, как и ранее, что при разработке и внедрении результатов в промышленность постоянно использовались разработанные под руководством авторов методы математического моделирования как на уровне АСУ ТП, так и в режиме поддерживающего верхнего уровня [18.1], см. также п. 18.1.

Элементы трехуровневой системы управления в разработке под руководством авторов совместно с заводом и ВНИПИавтоматпромом прошли промышленную проверку на кольцевой печи для нагрева трубных заготовок Первоуральского новотрубного завода, где применялся алгоритм ведения процесса нагрева при переменном темпе по оптимальным траекториям и отработывалась методика измерения температур металла в зонах методом двух пирометров для включения алгоритма обратной связи [18.16; 18.23; 18.27; 18.45; 18.241; 18.242; 18.293]. В совместных работах с ВНИПИавтоматпромом описанные подходы определения оптимальных траекторий нагрева с элементами ТАСУ нагревом применены на кольцевой печи завода в Хомутове (Чехия). Элементы трехуровневой системы реализованы на печи с шагающим подом стана 3000 завода Ильича (Украина) [18.294; 18.295]. Киевский институт автоматики с участием авторов применял разработанные зональные модели для идентификации параметров упрощенной модели, на базе которых ведется расчет оптимальных траекторий нагрева, а также для определения представительских точек установки датчиков температуры в зонах печи, в том числе на Новолипецком металлургическом комбинате и металлургическом заводе Амурсталь [18.42; 18.45; 18.243; 18.244].

В работе М.Б. Хаджийски, Е.Л. Кацаровой и Д. Тенчева [18.296] (Болгария) предложенные методики использовались для разработки систем управления нагревательными колодцами.

Система управления тепловым режимом современных проходных термических печей, включая новую систему автоматического регулирования подсосов в рабочее пространство печи путем контроля содержания кислорода в дымовых газах и управления тепловым режимом при непосредственном измерении температур труб в рабочем пространстве печи при участии автора внедрена на Первоуральском новотрубном заводе на отпускной печи при линии финишной термической обработки труб [18.3; 18.249; 18.250].

Система автоматического управления применительно к печи с импульсным отоплением разработана и применяется в длительной эксплуатации на ПНТЗ [18.2; 18.3; 18.247; 18.248].

Автоматизированная система удаленного доступа и управления разработана и применена на камерной термической печи [8.251; 18.253–18.255].

Система управления устройствами термоупрочнения арматуры в работе НИИ металлургической теплотехники разработана и применена с участием авторов в сортопрокатном цехе ОАО «Северсталь» [18.276].

Система подогрева вентиляционного воздуха, подаваемого в глубокие шахты с автоматическим поддержанием температуры внедрена на 16 стволах шахт, в том числе в 2012 г. на ОАО «Учалинский ГОК» (Озерное месторождение, добыча подземным способом) [18.3; 18.20; 18.24; 18.279–18.282].

Система диагностики топливных таблеток для атомных реакторов реализована для использования НИИ химического машиностроения [18.277].

В данной главе и параграфе выделена лишь часть арсенала систем и средств автоматики, применяемых с участием авторов при внедренческих работах.

Так, вопросы, связанные с конструкциями и управлением на сталеплавильных и стекловаренных печах (с использованием мазутных и газо-мазутных горелок для регулирования длины факела), на вращающихся трубчатых печах (горелки с регулированием длины факела и подачей интенсификатора), на нагревательных печах (регулируемые факельно-сводовые горелки и факельно-сводовое отопление, импульсное отопление, струйно-факельное отопление, автоматизированные печи для плавки крупногабаритных титановых сплавов и крип-отжига, электрогазовые горелки) освещены, в частности, в т. 3, Ч. 1 данного издания [18.3].

Таким образом, многие промышленные разработки, описанные в [18.1–18.3; 18.16–18.27] и др. изданиях, сопровождались с той или иной степенью применением усовершенствованных систем контроля автоматизированного управления, часто базирующихся на использовании методов математического моделирования [18.1].

В этом плане следует отдать должное предприятиям, с которыми авторам удалось сотрудничать, обеспечивающих техническую поддержку и реализацию соответствующих установок и систем. Ряд систем контроля управления описан также в гл. 19.

18.9. Управление энергоресурсами и энергоустановками

Данный параграф включает собственные разработки В. Г. Лисиенко, а также работы, проведенные в рамках диссертационных работ (под руководством В.Г. Лисиенко) М.Н. Спирина* и Д.Л. Анисимова**.

Разработки были связаны решением актуальных задач энергосбережения на соответствующих предприятиях.

18.9.1. Система управления энергоресурсами – сквозная и динамическая энергоемкость

Разработка системы и алгоритма

Известные системы управления энергоресурсами на предприятиях [18.20; 18.297; 18.298] используются в энергетических службах предприятий (например, службы главного энергетика) в виде дополнительных подсистем, например, такие как АСКУЭ – автоматизированная система контроля и управления энергосбережением. При этом используется и представление о полной или сквозной энергоемкости продукции, закрепленное в ГОСТе [18.299], а также известное (по предложению В. Г. Лисиенко) как технологическое топливное число – ТТЧ [18.1].

Однако в этих системах осуществляется количественная оценка расхода энергоресурсов, сквозных энергозатрат и полной энергоемкости в определенные моменты времени, показатель динамической энергоемкости не используется и не проводится экспертной оценки динамической энергоемкости в динамике и в темпе с процессом. Это не позволяет объективно оценивать обстановку с состоянием энергоресурсов в динамике, в режиме реального времени, выявлять лимитирующие (энергонезэффективные) звенья технологической цепочки и давать правильные, обоснованные рекомендации по повышению энергоэффективности энерготехнологий. Особенно это проявляется негативно на предприятиях с гибким производством при часто изменяющихся заказах и связанных с этим изменением производительности и энергоемкости продукции.

* Спирин М.Н. Разработка и применение математических моделей оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в сложных энергонасыщенных системах: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук /М.Н. Спирин. – Екатеринбург, 2003. – 24 с.

** Анисимов Д.Л. Разработка алгоритмических структур и программного обеспечения для организации автоматизированного учета потребления тепловой энергии на примере средств и систем линии КАРАТ: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук (проект) / Д.Л. Анисимов. – Екатеринбург.

Задачей данной разработки являлось обеспечение выдачи достоверной информации оператору-энергетику по изменению в динамике расходов энергоресурсов и динамической энергоемкости продукции в процессе производства для эффективного управления расходом энергоресурсов, снижения расхода.

Для решения данной задачи разработанная система управления энергоресурсами (см. рис. 18.185), включает объект управления, блок определения расходов энергоносителей, блок определения сквозных энергозатрат, блок определения производительности, при этом выходы объекта управления присоединены к входам блока определения расходов энергоносителей, блока определения сквозных энергозатрат и блока определения производительности, а также включает последовательно соединенные блок управления оператора и блок автоматизированного управления объектом, при этом выход последнего подсоединен к входу объекта управления, отличается тем, что система дополнительно снабжена блоками определения приращений расходов энергоносителей, сквозных энергозатрат и производительности, блоком динамической энергоемкости по расходам энергоносителей, блоком динамической энергоемкости и сквозным энергозатратам, блоком оценки объекта управления по расходу энергоносителей и блоком оценки объекта управления по сквозным энергозатратам, блоком монитора-советчика оператора, блоком задатчика времени приращений.

Система обеспечивает в динамике в пошаговом режиме оценку приращенной за заданный промежуток времени расходов энергоносителей сквозной энергоемкости и производительности выпуска продукции. Эти оценки проводятся как для сквозных энергозатрат, так и для их отдельных составляющих.

При этом управление проводится и для элементов составляющих энергоемкости продукции (электроэнергия, природный газ, отдельные энергоносители и т. д.). Кроме того, управление проводится и для отдельных стадий или агрегатов процессов и производств.

Таким образом, в данной разработке используется представление о динамической энергоемкости, характеризующей тенденции динамики изменения энергоемкости продукции или расходования отдельных видов энергоносителей при изменении производительности производства продукции [18.1; 18.301].

Это представление вводится следующим образом.

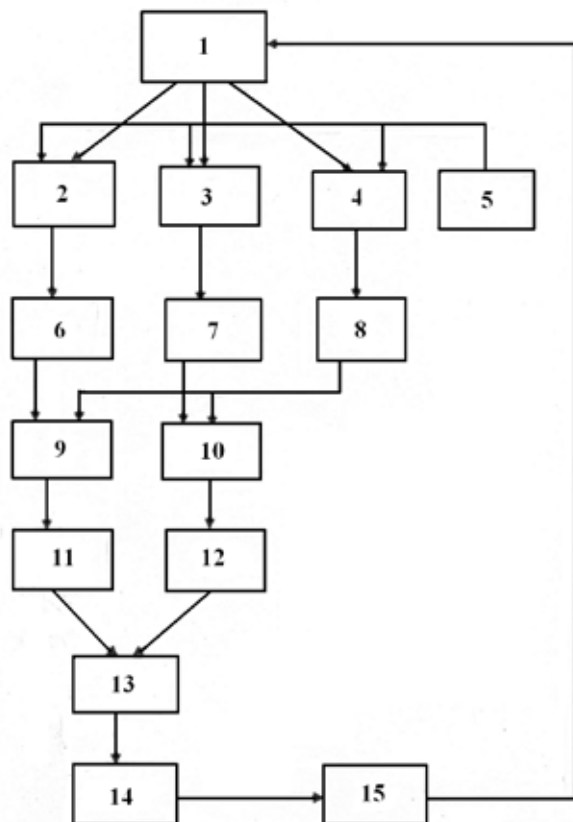


Рис. 18.185. Схема устройства системы управления энергоресурсами:

1 – энерготехнологический объект управления; блоки: 2 – расходов теплоносителей; 3 – сквозных энергозатрат; 4 – производительности; 5 – задатчика времени приращений расходов энергоносителей, сквозных энергозатрат и производительности; 6 – расходов энергоносителей; 7 – сквозных энергозатрат; 8 – производительности; 9 – динамической энергоемкости по расходам энергоносителей; 10 – динамической энергоемкости по сквозным энергозатратам; 11 – оценки объекта управления по расходам энергоносителей; 12 – оценки объекта управления по сквозным энергозатратам; 13 – монитора-советчика оператора; 14 – управления оператором; 15 – автоматического управления объектом

При изменении энергозатрат \mathcal{E}_c в связи с изменением производительности P получено соотношение (при условии $\mathcal{E}_c = EP$, E – статическая энергоемкость продукции)

$$d\mathcal{E}_c = dEP = EdP + PdE. \quad (18.392)$$

При делении правой и левой части на dP и после преобразования получено

$$\frac{dE}{dP} = \frac{1}{P} [dP(EP)/dP - E]. \quad (18.393)$$

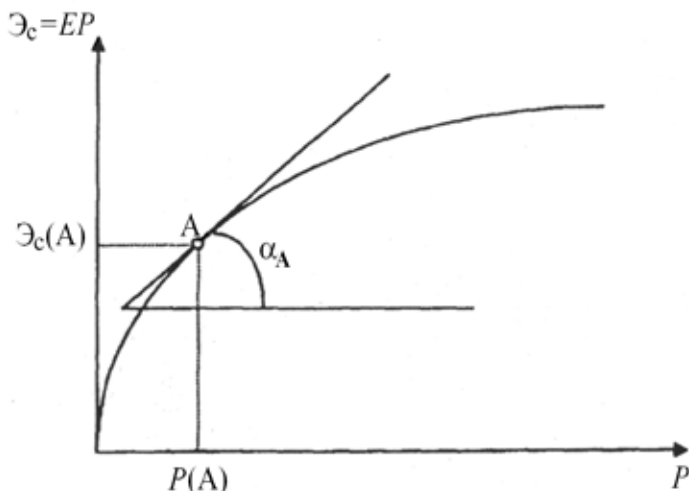


Рис. 18.186. Зависимость статической энергоёмкости продукции (ТТУ) \mathcal{E}_c от производительности P

В уравнении (18.393) величина $E = \frac{\mathcal{E}_c}{P} = \frac{EP}{P}$ является обычной (статической) энергоёмкостью, а величина $\frac{d\mathcal{E}_c}{dP} = \frac{d(EP)}{dP} = E_{\text{дин}}$,

характеризующая изменение энергозатрат, является динамической энергоёмкостью. Это наглядно представлено на рис. 18.186, где показан пример зависимости величины \mathcal{E}_c от P , а именно $\mathcal{E}_c = f(P)$. На рис. 18.186 в точке A кривой зависимости $\mathcal{E}_c = f(P)$

величина $E_A = \frac{\mathcal{E}_c(A)}{P(A)}$ – статическая энергоёмкость. Величина тан-

генса угла между касательной к кривой в точке A и горизонталью

– $\text{tg} \alpha_A = \frac{d\mathcal{E}_c(A)}{dP(A)} = E_{\text{дин}}$ является динамической энергоёмкостью.

В современных условиях важнейшим требованием эффективного потребления энергии является достижение прироста продукции (роста производительности) при обеспечении снижения темпов прироста расхода энергоносителей и энергозатрат. Именно такое производство в современных условиях является энергоэффективным. Математически это условие энергоэффективности выражается исходя из формулы (18.393) следующим образом.

Характеристика зависимости доли энергозатрат в себестоимости продукции от производительности

$$\frac{d\mathcal{E}_c}{dP} = \frac{d(EP)}{dP} = E_{\text{дин}} < E \text{ и } \frac{dE}{dP} < 0. \quad (18.394)$$

Из условия (18.394) следует, что для энергоэффективного производства характерна отрицательная величина производной энергоемкости продукции по производительности, или снижение темпов прироста энергозатрат по сравнению с ростом производительности. Именно динамическая энергоемкость $E_{\text{дин}}$ и определяет это условие.

Таким образом, для современных условий именно показатель динамической энергоемкости и показатель изменения энергоемкости продукции в динамике являются главным показателем энергоэффективности и энергосбережения.

Введение в рассмотрение в данной разработке представления о динамической энергоемкости делает возможным в динамике анализировать энерготехнологическую обстановку для управления, выявлять тенденции в изменении энергоемкости продукции и проводить энерготехнологическую оценку складывающейся динамики при изменении производительности агрегата или в целом производства. Это, в свою очередь, обеспечивает операторов-энергетиков и технологов необходимой информацией, связанной с оценкой складывающейся обстановки по использованию энергоресурсов, и обеспечивает своевременный выбор необходимых мероприятий по исключению перерасходования энергоресурсов, по выявлению источников (узких мест) этого перерасходования.

При частом изменении сортамента продукции в рассмотрение вводится условная производительность $P_{\text{усл}}$, определяемая по известным методикам как

$$P_{\text{усл}} = K_{\text{тр}} P, \quad (18.395)$$

где $K_{\text{тр}}$ – коэффициент трудоемкости данного сортамента продукции.

В предлагаемой системе основными наблюдаемыми параметрами являются производительность агрегата P или условная производительность (при изменении сортамента продукции) $P_{\text{усл}}$ и расходы энергоресурсов или сквозные энергетические затраты, определяемые как динамические характеристики при изменении этих величин. Принимается пошаговый (дискретный) режим оценки этих параметров в динамике. Кроме суммы энергоносителей, выраженной в ценовой форме или в энергетических единицах, могут использоваться и частные ее составляющие - расходы энергоносителей, преобладающие в данном технологическом процессе, например расход электроэнергии $E_{\text{эл}}$, расход природного газа и других отдельных энергоносителей, а также и отдельных составляющих материальных затрат.

Реализация данной системы управления осуществляется в режиме «советчика» оператора. Складывающаяся в процессе работы агрегата и производства динамика подвергается оценке и проводится их энерготехнологический рейтинг. Этой динамике присваивается определенная градация. Эти градации направлены на объективную, доступную управляющему оператору оценку складывающейся обстановки в зависимости от соотношения изменения производительности и энергоемкости.

В соответствии с рассмотренными представлениями о динамической энергоемкости, во всех случаях наилучшей оценкой считается динамика, при которой энергоемкость продукции уменьшается. Наоборот, динамика при увеличении энергоемкости продукции считается неблагоприятной. Исключение представляет динамика при снижении производительности, при которой энергоемкость продукции может увеличиться естественным образом.

В соответствии с уравнением (18.394) основой динамической энергоемкости является производная величины энергозатрат при производстве продукции по производительности. В практических условиях величины, входящие в данную производную, заменяются на приращения этих величин за определенный промежуток времени. Система управления энергоресурсами отслеживает приращения энергозатрат производства продукции $\Delta EP = \Delta \mathcal{E}$ и производительности ΔP и за определенный промежуток времени сравнивает эти приращения путем деления ΔEP на ΔP с определением динамической энергоемкости

$$E_{\text{дин}} = \frac{\Delta EP}{\Delta P} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta P}. \quad (18.396)$$

Величина $\Delta \mathcal{E}$ представляется как расход собственно энергоносителей $\Delta \mathcal{E}_p$, так и сквозными энергозатратами на производство продукции $\Delta \mathcal{E}_z$. При этом преимуществом оценки сквозных энергозатрат является учет расходования не только всех энергоносителей, но и расхода материальных ресурсов с позиций их энергоемкости.

По получаемым при этом величинам динамической энергоемкости $E_{\text{дин}}$ оценивается энергетическая динамика объекта, требуемая оператору для управления.

Например, при увеличении и уменьшении производительности эти оценки могут быть представлены в табл. 18.34, в которой соответствующие приращения оцениваются качественно. Таблица показывает, что при увеличении производительности эффективным считается относительное снижение приращения энергозатрат продукции, а при снижении производительности приходится часто констатировать увеличение энергозатрат.

Таблица 18.34

Оценка энергетической динамики объектов управления

Значения	Оценка энергетической динамики	
	$+\Delta P$	$-\Delta P$
До 0,4	Успешная	Неблагоприятная
0,4–0,7	Нормативная	Нормативная
0,7–1,0	Ухудшающаяся	Улучшающаяся
>1,0	Неблагоприятная	Успешная

Разработанная система работает следующим образом (см. рис. 18.185). В блоках 2, 3 и 4 определяются соответственно расходы энергоносителей, сквозные энергозатраты и производительность выпуска продукции объекта управления 1. Блок 5 определяет задаваемое время определения расходов энергоносителей, сквозных энергозатрат и производительности выпуска продукции и соответствующих приращений этих параметров за определенный промежуток времени (определяется оператором блока управления 14). В блоках 6, 7 и 8 определяются приращения за заданный промежу-

ток времени соответственно расходов энергоносителей $\Delta\mathcal{E}_p$, сквозных энергозатрат $\Delta\mathcal{E}_\Sigma$ и производительности ΔP в процентах от предыдущего момента времени.

В блоке 9 в соответствии с формулой (18.396) определяется динамическая энергоемкость объекта управления по расходу энергоресурсов

$$E_{\text{дин.Р}} = \frac{\Delta\mathcal{E}_p}{\Delta P}. \quad (18.397)$$

В блоке 10 также в соответствии с формулой (18.396) определяется динамическая энергоемкость объекта управления по сквозным энергозатратам

$$E_{\text{дин.}\Sigma} = \frac{\Delta\mathcal{E}_\Sigma}{\Delta P}. \quad (18.398)$$

Величины приращений $\Delta\mathcal{E}_p$, $\Delta\mathcal{E}_\Sigma$ и ΔP выражаются в процентах от предыдущего значения.

В блоках 11 и 12 проводится оценка объекта управления соответственно по расходам энергоносителей и сквозным энергозатратам в соответствии с табл. 18.34.

Данная информация поступает на блок - монитора-советчика оператора 13 для представления оценок динамики расходования энергоресурсов оператору. Оператор, используя блок управления оператора 14, применяет полученную информацию об энергетической динамике объекта управления для принятия решений и соответствующего воздействия на объект управления с использованием блока автоматизированного управления объектом 15.

В блоке 7 определяются как сквозные энергозатраты выпуска продукции, так и их отдельные составляющие (по видам энергоносителей и материальных ресурсов).

Пример реализации системы управления энергоресурсами

Объектом управления (блок 1) являлся цех производства холоднокатаной трансформаторной стали (ЦХП). При определении расходов энергоносителей и сквозных энергозатрат принято выражать эти величины в кг у.т.

В блоке 5 задано время определения приращения расходов энергоносителей, сквозных энергозатрат и производительности - 1 ч. В определенный момент времени в блоке 2 определены расходы энергоносителей: в данном случае это расход электроэнергии - 15180 кг у.т./ч.

В блоке 3 определены сквозные энергозатраты \mathcal{E}_3 с учетом энергоемкости расходов: первичной энергии \mathcal{E}_1 (в данном случае отсутствует $\mathcal{E}_1 = 0$), производных энергоносителей \mathcal{E}_2 (в данном случае это: теплоэнергия (пар), сжатый воздух, вода: чистая общецеховая, грязная общецеховая, химочищенная, подпиточная, химобессоленная), сквозных энергоносителей \mathcal{E}_3 (в данном случае это используемые материалы: серная кислота, гуммирование, технологическая смазка, оксиды магния, кальция, сульфат магния, электроизоляционный раствор, ортофосфорная кислота, гидроокись алюминия, электроизоляционный лак, материалы для упаковки), энергоемкости расходов вторичных энергоресурсов \mathcal{E}_4 (в данном случае это вода обратная, тепло от сжигания масла отходов).

Расчет сквозных энергозатрат \mathcal{E}_3 в блоке 3 проводится по формуле

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4, \quad (18.399)$$

по методике, предложенной в [18.1].

Как следует из формулы (18.399), преимуществом оценки сквозных энергозатрат является учет как энергетических, так и материальных расходов.

Эта величина получена в определенный момент времени равной (без учета энергоемкости подката) $\mathcal{E}_3 = 30160$ кг у.т./ч.

В блоке 4 в определенный момент времени определена также производительность по выпуску трансформаторной стали $P = 20$ т/ч.

Рассмотрим различные варианты по управлению энергоресурсами.

1. Через 1 ч времени в блоках 6, 7 и 8 определены приращения за заданный промежуток времени -1 ч соответственно расхода электроэнергии - на +10 %, сквозных энергозатрат - на +12 % и производительности - на +20 %.

В блоке 9 по формуле (18.397) определена динамическая энергоемкость объекта управления по расходу энергоресурсов (электроэнергии)

$$E_{\text{дин.}\Sigma} = \frac{10}{20} = 0,5.$$

В блоке 10 определена по формуле (18.398) динамическая энергоемкость объекта управления по сквозным энергозатратам

$$E_{\text{дин.}\Sigma} = \frac{12}{20} = 0,6.$$

В блоках 11 и 12 проверена оценка объекта управления по динамической энергоемкости в соответствии с табл. 18.34 как «нормативная», как по расчету электроэнергии, так и по сквозным энергозатратам. Эта информация поступает на монитор-советчик 13 и далее на блок управления оператора 14. В данном варианте в связи с нормативной оценкой динамики энергоемкости не требуется проводить каких-либо воздействий на объект управления через блок 15.

2. Через определенное время в блоках 6, 7 и 8 определены за заданный промежуток времени – 1 ч приращения соответственно расхода электроэнергии на 12 %, сквозных энергозатрат на 13 % и производительности на 10 %.

В блоке 9 определена по формуле (18.397) динамическая энергоемкость объекта управления по расходу энергоресурсов (электроэнергии)

$$E_{\text{дин.}P} = \frac{12}{10} = 1,2.$$

В блоке 10 определена по формуле (18.398) динамическая энергоемкость объекта управления по сквозным энергозатратам

$$E_{\text{дин.}\Sigma} = \frac{13}{10} = 1,3.$$

В блоках 11 и 12 проведена оценка объекта управления по динамической энергоемкости в соответствии с табл. 18.34 как «неблагоприятная», соответственно по расходу электроэнергии и по сквозным энергозатратам. Эта информация поступает на монитор-советчик 13 и далее на блок управления оператора 14. В данном случае имеет место относительный существенный перерасход как электроэнергии, так и суммы сквозных энергозатрат. Оператор через блок управления 14 и блок автоматизированного управления

объектом 15 с использованием блоков 2 и 3, 6 и 7 определяет источник перерасхода энергоресурсов (в данном случае это, в первую очередь, электроэнергия) и принимает меры, предусмотренные технологической инструкцией для снижения расходов соответствующих энерго- и материальных ресурсов.

3. Через определенное время в блоках 6, 7 и 8 определены за заданный промежуток времени – 1 ч приращения соответственно расхода электроэнергии на – 2 %, сквозных энергозатрат на – 3 % и производительности на –10 %.

В блоке 9 по формуле (18.397) определена динамическая энергоемкость объекта управления по расходу энергоресурсов (электроэнергии)

$$E_{\text{дин.Р}} = \frac{-2}{-10} = 0,2.$$

В блоке 10 по формуле (18.398) определена динамическая энергоемкость объекта управления по сквозным энергозатратам

$$E_{\text{дин.Э}} = \frac{-3}{-10} = 0,3.$$

В блоках 11 и 12 оценки объекта управления по динамической энергоемкости определены в соответствии с табл. 18.34 как «неблагоприятная», соответственно по расходу электроэнергии и сквозным энергозатратам. Эта информация, поступившая через монитор-советчик 13 на блок управления оператора 14, также как и в предыдущем случае свидетельствует об относительном существенном перерасходе как электроэнергии, так и сквозных энергозатрат. Оператор с использованием блоков 2 и 3, 6 и 7 определяет источники перерасхода энергетических и материальных ресурсов и через блоки 14 и 15 принимает меры, предусмотренные технологической инструкцией, по снижению этих расходов.

Применение данной системы обеспечивает в режиме советчика оперативную оценку динамики расходования энергоресурсов, что позволяет оператору обоснованно в темпе с процессом (в режиме реального времени) определять источники возможных перерасходов энергетических и материальных ресурсов и своевременно реагировать на изменяющуюся обстановку, принимая в нужных слу-

чаях соответствующие энергосберегающие меры, что приводит к экономии энергетических и материальных ресурсов.

Возможности технической реализации

Как вариант, для цели технической прогнозирования и управления, расходами энергоносителей при производстве трансформаторной стали предлагалось построить нейронную сеть (НС) на базе СУБД MS SQL Server 2000 в комплексе с системой сквозного энергетического анализа (CEA) [18.302]. НС реализована в виде базы данных с комплектом хранимых процедур на языке Transact-SQL в составе сервера CEA (рис. 18.187).

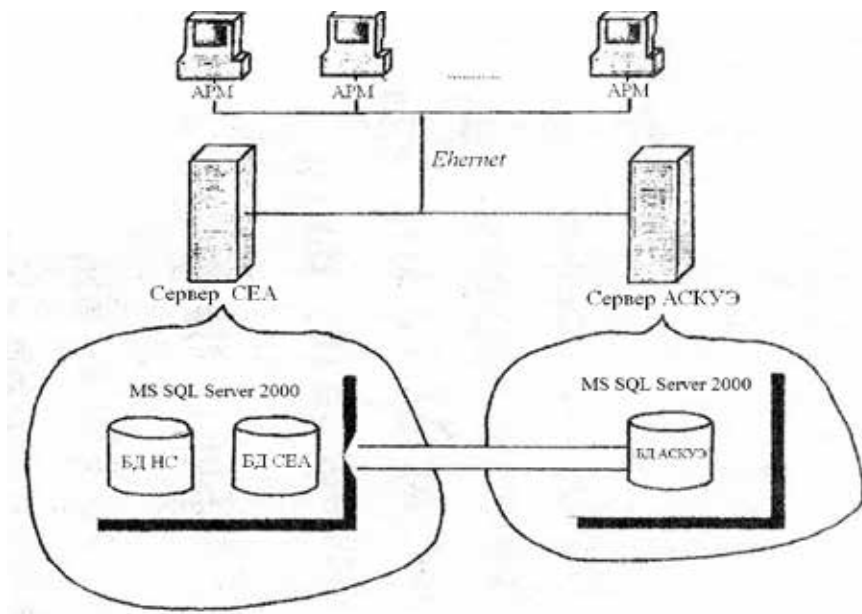


Рис. 18.187. Обобщенная структурная схема управления расходом энергоносителей

При этом отмечено, что нейронные сети представляют собой новую и весьма перспективную вычислительную технологию, дающую новые подходы к исследованию динамических задач, в том числе моделированию технологических процессов. Актуальность исследований в этом направлении подтверждается массой различ-

ных применений НС. Это автоматизация процессов распознавания образов, адаптивное управление, аппроксимация функционалов, прогнозирование, создание экспертных систем, организация ассоциативной памяти и многие другие приложения.

Моделирование энерготехнологических процессов с помощью НС открывает очень широкие перспективы на пути создания интеллектуальных систем сбора и обработки энерготехнологической информации, прогно-зирования, а также эффективного управления ресурсами предприятия.

Основные преимущества НС:

1. Способность обучаться на множестве примеров в тех случаях, когда неизвестны закономерности развития ситуации и какие бы то ни было зависимости между входными и выходными данными. В таких случаях «пасуют» как традиционные математические методы, так и экспертные системы.

2. Нейронные сети способны успешно решать задачи, опираясь на неполную, искаженную, зашумленную и внутренне противоречивую входную информацию.

3. Эксплуатация обученной нейронной сети по силам и неподготовленному пользователю.

НС будет обладать механизмом самоадаптации, т. е. для обучения не потребуется вмешательство человека. На сегодняшний день теория НС позволяет проектировать самоадаптирующиеся НС по средствам использования как стохастических так и детерминированных алгоритмов подстройки.

В режиме обучения НС в качестве входного вектора принимает данные о количестве выпускаемой продукции за расчетный интервал времени (из базы данных СБА), а в качестве желаемого вектора – информацию о расходах энергоносителей за этот же интервал (из базы данных АСКУЭ). В режиме опроса в задачу НС входит формирование планируемого вектора расхода энергоносителей по планируемому объему выпускаемой продукции. На рис. 18.187 представлена обобщенная структурная схема системы.

18.9.2. Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в энергонасыщенных комплексах

Как отмечалось, эта разработка проводилась М.Н. Спириным под руководством В. Г. Лищенко при участии кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ [18.303–18.305].

Постановка задачи

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что развитие предприятий металлургического и энергетического комплекса, решение проблем энергосбережения, повышения качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке требуют усовершенствования систем использования информации, применяемых как для управления технологическими процессами, так и управления производством в целом.

Особое место среди металлургических переделов современной металлургии занимает доменное производство как самое энергоемкое и сложное, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в черной металлургии, а в энергетике – это тепловые электрические станции, вырабатывающие подавляющее количество производимой в стране тепловой и электрической энергии. Следует отметить, что данные технические системы имеют общие признаки. Анализ показывает, что они относятся к классу сложных, энергоемких и одновременно энергораспределенных систем. Одним из важнейших условий создания эффективных АСУ таких объектов является разработка математических моделей, которые позволяют получить расчетным путем новую обширную информацию о процессах, происходящих в промышленных агрегатах, осуществить оптимизацию их режимных параметров, разрабатывать и совершенствовать алгоритмы управления технологическими и техническими системами.

Поэтому актуальной задачей являлась разработка математических моделей, алгоритмов оптимизации и комплекса программ для автоматизированных систем распределения топливно-энергетических ресурсов в сложных энергонасыщенных распределенных системах (на примерах доменного производства и тепловых электрических станций), в том числе для создания автоматизированных рабочих мест инженерно-технического персонала по управлению энергоснабжением.

Работа выполнялась с использованием современных принципов построения математических моделей, предназначенных для управления сложными энергонасыщенными системами, методов математического моделирования для определения параметров модели и математического программирования для выбора оптимальных значений расходов топливно-энергетических ресурсов.

При постановке исследований учитывалась важность решения задач оптимизации параметров комбинированного топлива (кокс, природный газ) между печами доменного цеха с целью рационального распределения топливно-энергетических ресурсов. Хотя эти задачи ставились и решались например, в работах Б.И. Китаева, А.А. Андропова, А.В. Бородулина, Ю.Н. Овчинникова, И.Г. Товаровского, С.В. Шаврина, А.В. Ченцова, Ю.Г. Ярошенко, и тем не менее наибольшие сложности связаны с разработкой методов количественной оценки влияния того или иного ресурса на показатели плавки в конкретной технологической ситуации. При постановке и решении задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов требуется не только изучение статических характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так и внутренних ограничений. Кроме того, на практике приходится оценивать техническое состояние печи и оборудования, объем расходов природного газа, качество сырья и другие факторы, которые учитываются только методом экспертных оценок.

Теоретические исследования в области разработки современных методов определения оптимальных режимов сложных энергосистем выполнялись в работах как отечественных, так и зарубежных ученых. Разные авторы, рассматривая задачу оптимизации режимов ТЭС, вводят, вследствие чрезвычайной сложности исходной задачи, те или иные упрощения и допущения. Среди применяемых при решении этих задач методов наибольшую популярность получили различные модификации градиентных методов, которые, как правило, используются в сочетании с методом штрафных функций и др. Однако к большим осложнениям при решении приводит конфигурация используемых характеристик: относительных приростов объемов ресурсов, их пологие участки и разрывы непрерывностей первого рода, что существенно влияет на сходимость вычислительных процессов.

Поиск новых методов решения энергетической задачи был продиктован следующими основными причинами:

- необходимостью оперативно рассчитывать характеристики в темпе с процессом при поступлении информации об изменении состава оборудования на той или иной ТЭС;

- отсутствием для многих типов турбин материалов по характеристикам объектов;
- потребностью комплексного распределения электрических и тепловых нагрузок между агрегатами ТЭС.

Таким образом, были поставлены следующие задачи:

1. Разработка принципов построения и методов решения оптимизационных задач управления топливно-энергетическими ресурсами в сложных, энерго-распределенных технических системах.

2. Исследование и создание оптимизационных математических моделей для решения задач оптимального распределения расхода природного газа в группе доменных печей.

3. Разработка математических моделей и программного обеспечения для компьютерных систем поддержки принятия решений по управлению топливно-энергетическими ресурсами в рамках автоматизированных рабочих мест инженерно-технического персонала доменного цеха.

4. Разработка математических моделей и программного обеспечения АРМ для оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузок между агрегатами ТЭС.

Оптимизационная модель распределения топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей

Важно было оценить принципы построения оптимизационных моделей распределения топливно-энергетических ресурсов на основе математического программирования. Было показано, что использование метода множителей Лагранжа не позволяет эффективно решать задачи оптимизации сложных энергетических комплексов. Так, известный вывод, вытекающий из этого метода при оптимальном распределении потоков сырья производные от критериев оптимальности всех процессов (агрегатов), на которые это сырье распределяется, должны быть равны между собой, сам по себе представляет практический интерес и может в ряде случаев быть использован для организации управления и планирования производства. Однако применение его в конкретных производственных ситуациях сопряжено с существующими затруднениями.

В этой постановке не учитываются, как правило, индивидуальные для каждой из печей цеха ограничения, в частности, на тепло-

вой, газодинамический и шлаковый режимы плавки, нарушение которых недопустимо при выполнении рекомендаций по перераспределению ресурсов. При решении задачи, связанной с необходимостью учета ограничений в форме неравенств, наложенных на различные зависимые переменные, этот метод становится практически непригодным. К большим осложнениям решения приводит конфигурация используемых характеристик относительных приростов объемов ресурсов, их пологие участки и разрывы непрерывностей первого рода существенно влияют на сходимость вычислительных процессов при решении задач оптимизации.

Новые подходы, предложенные в работе, дают возможность свести к минимуму указанные недостатки и базируются на следующих положениях:

- в случае сложности исходной задачи и необходимости учета большого числа нелинейных ограничений типа неравенств, при небольших колебаниях параметров относительно базовых значений целесообразно использовать принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. При таком подходе имеется возможность в исходной постановке в значительно большей степени учесть технологические особенности функционирования каждого агрегата в отдельности, однако при этом требуется оценить погрешности линеаризации модели оптимизируемой системы. Именно такой подход применим для решения задач оптимального распределения комбинированного дутья в группе доменных печей;

- в случаях нелинейных функциональных зависимостей между оптимизируемыми параметрами, а также при изменении состава оборудования в процессе эксплуатации системы и числа оптимизируемых параметров следует использовать усовершенствованные, наиболее эффективные вычислительные процедуры оптимизации систем. Именно такой подход, например, эффективен при решении задачи оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузок между агрегатами ТЭС.

Анализ нелинейности характеристик доменного процесса позволил установить пределы изменения режимных параметров, при которых допустимо использование линеаризованных моделей. Установлено, что, например, применительно к условиям работы до-

менных печей ОАО ММК применение линеаризованных моделей не превышает допустимой погрешности (5 %) при изменении расхода природного газа до 30 м³/т чугуна. Это обстоятельство позволяет в дальнейшем использовать линеаризованные модели доменного прогресса, так как колебания параметров печей при перераспределении природного газа на работающих печах цеха нижеуказанного значения и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию.

В тоже время анализ нелинейности моделей доменного процесса показывает, что при решении задач оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в силу относительно небольшого отклонения параметров от базового состояния, достаточно использовать линеаризованные зависимости, что позволяет свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. Под базовыми значениями величины понимаются значения, найденные за такой период усреднения информации, при котором влияние динамических погрешностей несущественно. Иными словами под базовой составляющей понимается информация, усредненная на таком интервале времени, на котором ошибки связанные с переходными процессами, сказываются незначительно на результатах расчета.

В системе учитывались различные виды ограничений: на работу цеха в целом, т. е. связанные с ограниченностью имеющихся ресурсов по природному газу, кислороду, коксу, необходимостью выполнения плана по выплавке чугуна, а также технологические ограничения индивидуальные для каждой печи в отдельности, обусловленные различием в конструктивных и режимных параметрах каждой из печей цеха. При выборе основных ограничений использовалась физическое обоснование и классификация лимитирующих факторов при инъекции топлив и обогащении дутья кислородом, основанных на закономерностях теплообмена.

В качестве исходных данных использовались фактические режимные и конструктивные параметры работы всех печей цеха в исходном базовом периоде, хранящиеся в базе данных доменного цеха. Предельно допустимые значения величин определяются методом экспертных оценок, что позволяет осуществить настройку модели на реальный процесс путем формализации опыта технологического персонала.

Оптимизационная модель распределения природного газа в общем случае сводится к следующему.

Целевая функция

$$Z = \sum_{i=1}^n \left\{ \alpha (e_i C_k - C_{\text{пр}}) + (1 - \alpha) C_{\text{п}} [\Delta \Pi_i^k] \right\} V_i^{\text{пр}} \rightarrow \max, \quad (18.400)$$

где n – число печей в рассматриваемой группе (цехе); α – весовой коэффициент, $0 < \alpha < 1$; e_i – эквивалент замены кокса, кг кокса / (м³ пр.газа); C_k – стоимость кокса, руб./кг кокса; $C_{\text{пр}}$ – стоимость природного газа, руб./м³ пр.газа; $C_{\text{п}}$ – условно постоянный коэффициент, руб./т чугуна; $\Delta \Pi_i^k$ – изменение производительности, т чугуна/м³ природного газа; $\Delta \Pi_i^k$ – изменение производительности печи, т чугуна/кг кокса; $V_i^{\text{пр}}$ – расход природного газа, м³/ч; Z – эффективность использования природного газа по цеху, руб./ч.

Ограничения в целом по цеху.

По расходу природного газа:

$$\sum_{i=1}^n V_i^{\text{пр}} \leq V_{\text{пр}}^{\Sigma}, \quad (18.401)$$

где $V_{\text{пр}}^{\Sigma}$ – ресурс цеха по природному газу, м³/ч.

По расходу кокса

$$\sum_{i=1}^n \left\{ K_{0i} + 0,001 (V_{i0}^{\text{пр}} - V_i^{\text{пр}}) e_i \right\} \leq K_{\Sigma}, \quad (18.402)$$

где K_{0i} – расход кокса на печь, т/ч; K_{Σ} – резерв по коксу цеха, т/ч; $V_{i0}^{\text{пр}}$ – расход природного газа на печь в базовом периоде, м³/ч.

По объему производства чугуна:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^k + \Delta \Pi_{i0} \right\} \geq \Pi_{\Sigma}, \quad (18.403)$$

где Π_{Σ} – требуемое производство чугуна в цехе, т/ч; Π_{i0} – производительность i -й печи, т/ч.

В общем случае технологические условия, ограничивающие применение природного газа, сводятся к следующему:

- обеспечение достаточного количества теплоты в нижней и верхней ступенях теплообмена доменной печи;

- обеспечение полной конверсии природного газа в районе фурменных очагов;
- стабилизация газодинамического режима слоя шихтовых материалов;
- обеспечение высокой степени использования восстановительного потенциала монооксида углерода и водорода;
- получение чугуна требуемого химического состава с допустимым содержанием в нем серы.

В качестве параметров, характеризующих тепловое состояние печи с использованием приращений приняты (см. также п. 18.5.2):

1) обобщенный показатель теплового состояния низа печи (индекс низа)

$$Q_{in}^{\min} \leq \left\{ (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta Q_{in}^{\text{nr}} - e_i (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta Q_{in}^k + \right. \\ \left. + [\Delta \Pi_i^{\text{nr}} (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) - e_i (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta \Pi_i^k] \Delta Q_{in}^n + Q_{in0} \right\} \leq Q_{in}^{\max}, \quad (18.404)$$

где $\Delta Q_{in}^{\text{nr}}$ – приращение теплоты состояния низа печи при увеличении расхода природного газа на м³/ч, т. е. МДж/т чуг./м³/ч.; ΔQ_{in}^k – приращение теплоты низа печи при увеличении расхода кокса на кг кокса/ч, т. е. МДж/т чуг./кг кокса/ч; ΔQ_{in}^n – приращение теплоты низа печи при увеличении производительности печи на т/ч, т. е. МДж/т чуг./т чуг/ч; Q_{in0} – индекс теплового состояния низа печи в базовом режиме, МДж/т чуг.; Q_{in}^{\max} – максимально допустимое значение индекса низа печи, МДж/т чуг.; Q_{in}^{\min} – минимально допустимое значение индекса низа, МДж/т чуг.;

2) теоретическая температура горения на фурмах:

$$T_i^{\min} \leq (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta T_i^{\text{nr}} + T_i^0 \leq T_{in}^{\max}, \quad (18.405)$$

где ΔT_i^{nr} – изменение теоретической температуры горения при увеличении расхода природного газа на печи на м³/ч, т. е. °C/(м³/ч); T_i^0 – теоретическая температура горения на i -й печи в базовом периоде, °C; T_{in}^{\max} и T_{in}^{\min} – максимально и минимально допустимые значения теоретических температур горения, °C;

3) содержание кремния в чугуне:

$$Si_j^{\min} \leq (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta Si_j^{\text{nr}} - e_i (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta Si_j^k + \\ + [\Delta \Pi_i^{\text{nr}} (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) - e_i (V_i^{\text{nr}} - V_{i0}^{\text{nr}}) \Delta \Pi_i^k] \Delta Si_j^n + Si_{j0} \leq Si_j^{\max}, \quad (18.406)$$

где $\Delta Si_j^{\text{пр}}$ – приращение содержания кремния в чугуна (в %) при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$; ΔSi_j^k – приращение содержания кремния в чугуна (в %) при увеличении расхода кокса на $\text{кг}/\text{ч}$; ΔSi_j^n – приращение содержания кремния в чугуна (в %) при увеличении производительности печи на $\text{т}/\text{ч}$; Si_{j0} – содержание кремния в чугуна в базовом периоде, %; Si_j^{max} , Si_j^{min} – максимально и минимально допустимые содержания кремния в чугуна, %;

4) отношение теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней степени теплообмена:

$$m_i^{\text{min}} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta m_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta m_i^k + \\ + [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^k] \Delta m_i^n + m_{i0} \leq m_i^{\text{max}}, \quad (18.407)$$

где $\Delta m_i^{\text{пр}}$ – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$; Δm_i^k – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении расхода кокса на $\text{кг}/\text{ч}$; Δm_i^n – изменение отношения теплоемкостей потоков при увеличении производительности печи на $\text{т}/\text{ч}$; m_{i0} – отношение теплоемкостей потоков на печи в базовом режиме; m_i^{max} , m_i^{min} – максимально и минимально допустимые значения отношения теплоемкостей потоков.

Учет полноты конверсии природного газа и газодинамического режима доменной плавки сводится к следующему:

1) прямые ограничения на расход природного газа на каждую из печей цеха

$$V_{i\text{min}}^{\text{пр}} \leq V_i^{\text{пр}} \leq V_{i\text{max}}^{\text{пр}}, \quad (18.408)$$

где $V_{i\text{min}}^{\text{пр}}$, $V_{i\text{max}}^{\text{пр}}$ – соответственно минимально и максимально допустимые расходы природного газа, $\text{м}^3/\text{ч}$;

2) степень уравнивания шихты

$$C_{yi}^{\text{min}} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta C_{yi}^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta C_{yi}^k + C_{yi0} \leq C_{yi}^{\text{max}}, \quad (18.409)$$

где $\Delta C_{yi}^{\text{пр}}$ – изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода природного газа на $\text{м}^3/\text{ч}$; ΔC_{yi}^k – изменение степени уравнивания шихты при увеличении расхода кокса на $\text{кг}/\text{ч}$;

C_{yi0} – степень уравнивания шихты в базовом периоде;
 C_{yi}^{\min} , C_{yi}^{\max} – соответственно минимально и максимально допустимые степени уравнивания шихты.

Оценивается содержание серы в чугуне

$$S_i^{\min} \leq (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta S_i^{\text{пр}} - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta S_i^k + \\ + [\Delta \Pi_i^{\text{пр}} (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) - e_i (V_i^{\text{пр}} - V_{i0}^{\text{пр}}) \Delta \Pi_i^k] \Delta S_i^n + S_{i0} \leq S_i^{\max}, \quad (18.410)$$

где $S_i^{\text{пр}}$ – приращение содержания серы в чугуне (в %) при увеличении расхода природного газа на м³/ч; ΔS_i^k – приращение содержания серы в чугуне (в %) при увеличении расхода кокса на кг/ч; ΔS_i^n – приращение содержания серы в чугуне (в %) при увеличении производительности печи на т/ч; S_{i0} – содержание серы в чугуне на данной печи в базовом периоде, %; S_i^{\max} , S_i^{\min} – соответственно максимально и минимально допустимые содержания серы в чугуне, %.

Следовательно, в данной постановке учтены ограничения по тепловой работе «верха» (m) и «низа» ($Q_{\text{н}}$, T) печи, химическому нагреву (содержание в чугуне Si), качеству чугуна (содержание в чугуне S), качеству чугуна, газодинамическим характеристикам работы печи (C_y). При этом предельно допустимые значения величин, т. е. численные значения параметров $V_{i\text{max}}^{\text{пр}}$, $V_{i\text{min}}^{\text{пр}}$, $Q_{\text{ни}}^{\max}$, $Q_{\text{ни}}^{\min}$, T_i^{\max} , T_i^{\min} , S_i^{\min} , S_i^{\max} , m_i^{\min} , m_i^{\max} , S_i^{\min} , S_i^{\max} , C_{yi}^{\min} , C_{yi}^{\max} определялись методом экспертных оценок, что позволяет осуществлять настройку модели на реальный процесс путем формализации опыта инженерно-технического и технологического персонала.

Разработанная методика позволяет не только определять рекомендации по распределению природного газа с целью получения максимальной выгоды от использования комбинированного дутья с учетом лимитирующих факторов, но и прогнозировать оптимальные значения расходов природного газа на каждую из печей при изменении объема выделенных цеху ресурсов, при остановке одной или нескольких печей, при изменении режимных параметров работы отдельных доменных печей и при других технологических ситуациях.

В основу модели теплового состояния доменной печи положены закономерности теплообмена в современной доменной плавке,

разработанные Уральской научной школой (основатели – Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, их последователи [18.67; 18.68; 18.96; 18.97; 18.133–18.139]). Показано, что перспективным для решения рассматриваемых задач является натурно-математический подход, разработанный в УГТУ-УПИ (УрФУ). Выполненными ранее исследованиями установлено, что модель теплового состояния доменной печи (модель УПИ (УрФУ)) в целом пригодна для решения задач контроля и анализа теплового режима доменной печи.

Последующее усовершенствование модели теплового состояния путем учета особенностей газодинамического и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, выявление основных факторов взаимного влияния теплового состояния, газодинамического и шлакового режимов, значительно расширили возможности этой модели (Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, О.П. Онорин [18.39; 18.146]). Эти обстоятельства позволили выбрать ее в качестве основы для расчета коэффициентов оптимизационной модели. Интерпретация решаемых задач применительно к оптимизационной означает определение следующих основных параметров, характеризующих тепловое состояние i -й печи: e_i , ΔQ_{in}^{nr} , ΔQ_{in}^k , ΔQ_{in}^n , Q_{in0} , ΔT_{in}^{nr} , ΔSi_j^{nr} , ΔSi_j^k , ΔSi_j^n , Δm_i^{nr} , Δm_i^k , Δm_i^n . Основными коэффициентами, определяемыми из подсистемы газодинамического режима математической модели доменной плавки, являются C_{yi0} , ΔC_{yi}^{nr} , ΔC_{yi}^k . К выходным параметрам подсистемы шлакового режима относятся ΔSi^k , ΔSi^n , ΔSi^{nr} .

Таким образом для решения задачи оптимизации было необходимо, путем проведения численных экспериментов с помощью математической модели, исследовать закономерности работы всех печей цеха в базовом периоде и определить соответствующие значения этих параметров, индивидуальные для каждой из печей при изменении расходов природного газа, кокса и производительности.

Оптимизация распределения тепловой и электрической нагрузок между агрегатами ТЭС

Рассмотрена физическая математическая постановка задачи для тепловой электрической станции, имеющей сложную распределенную тепловую схему (см. рис. 18.188).

Требуется на всем допустимом диапазоне изменения электрической нагрузки ТЭС получить такую ее расходную характеристику,

в каждой точке которой достигается минимум расхода топлива (B) за счет оптимального распределения электрической и тепловой нагрузки между агрегатами.

$$B(P) \Rightarrow \min, \forall P \in [P_{\min}, P_{\max}], \quad (18.411)$$

где P – текущая, P_{\min} – минимальная, P_{\max} – максимальная электрические нагрузки ТЭС.

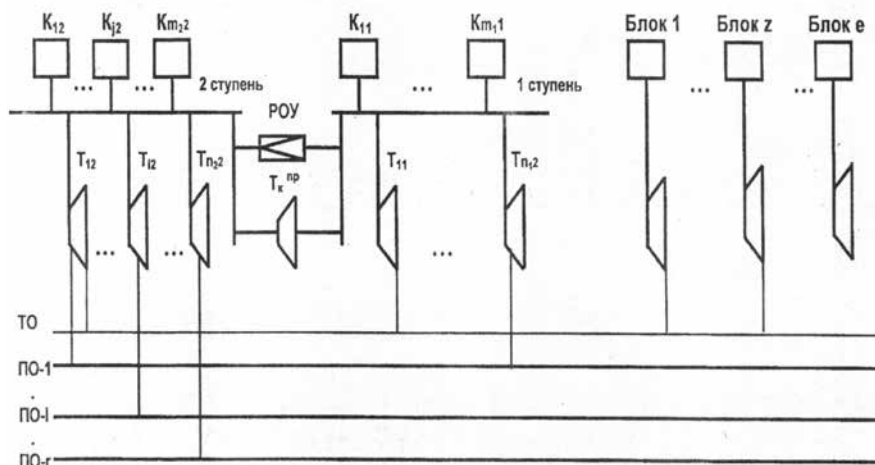


Рис. 18.188. Принципиальная тепловая схема ТЭС:

$K_j S$ – котел, s – ступени; T_{is} – i – турбина, s – ступени; РОУ – редукционно-охладительное устройство; $T_K^{\text{пр}}$ – k – предвключенная турбина; ТО – теплофикационный отбор пара; ПО – производственный отбор пара

Функцию цели (Z) можно определить следующим образом:

$$Z = B_2 \left(\sum_i Q_{Ti2} + \sum_k Q_{TK}^{\text{пр}} + Q_{\text{пoy}}' \right) + B_1 \left(\sum_i Q_{Ti1} - \sum_k Q_{TK}^{\text{пр}} - Q_{\text{пoy}}'' \right) + \sum_z B_z(Q_z) \Rightarrow \min, \quad (18.412)$$

$$\forall P \in [P_{\min}, P_{\max}],$$

где i – номер турбины; k – номер предвключенной турбины; s – номер ступени ($s = 1, 2$); z – номер блока; B_1, B_2 – расходы топлива

котлов первой и второй ступени; B_z – расход топлива z -го блока; Q_{Tis} – расход теплоты i -й турбины s -й ступени; $Q_{TK}^{np'}$, $Q_{TK}^{np''}$ – расход теплоты k -й предвключенной турбины на входе и выходе; Q_z – расход теплоты z -го блока.

Все агрегаты ТЭС представлены следующими расходными характеристиками для котлоагрегатов B_{kjs} , турбин Q_{Tis} , предвключенных турбин $Q_{TK}^{np'}$, $Q_{TK}^{np''}$ и РОУ Q_{poy}' , Q_{poy}'' :

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{kjs} = f_{kjs}(Q_{kjs}); \\ Q_{Tis} = \varphi_{is}(P_{is}, Q_{isl}^{no}, Q_{is}^{to}); \\ Q_{TK}^{np'} = \psi_k'(P_k); \\ Q_{TK}^{np''} = \psi_k''(P_k); \\ Q_{poy}' = g'(Q_{poy}''), \end{array} \right. \quad (18.413)$$

где j – номер котла; I – номер коллектора производственного отбора; Q_{kjs} – тепловая нагрузка котла; Q_{isl}^{no} , Q_{is}^{to} – производственный и теплофикационный отборы.

Для котельного оборудования задаются характеристики КПД брутто $\eta_{бр} = f(Q)$ для разных видов сжигаемого топлива, то есть каждому котлу может соответствовать несколько характеристик.

Следовательно, в результате решения задачи определяются:

- оптимальное распределение тепловой и электрической нагрузок между агрегатами электростанции;
- минимальная и максимальная электрические нагрузки электростанции;
- рассчитываются энергетические характеристики на всем диапазоне изменения электрической нагрузки;
- осуществляется распределение нагрузки между котельным и турбинным оборудованием в соответствии с заданной электрической мощностью электростанции.

При оптимизации учитываются ограничения по минимальной и максимальной нагрузкам агрегатов (котлов, турбин), по балансам тепловой нагрузки для электростанций с поперечными связями и по суммарным величинам отборов тепла на производственные нужды и теплофикацию.

Математически ограничения сводятся к следующему:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{kjs, \min} \leq Q_{kjs} \leq Q_{kjs, \max}; \\ Q_{Tis, \min} \leq Q_{Tis} \leq Q_{Tis, \max}; \\ Q_{Tk, \min}^{\text{np}'} = Q_{Tk}^{\text{np}'} \leq Q_{Tk, \max}^{\text{np}'}; \\ Q_{poy, \min} \leq Q_{poy} \leq Q_{poy, \max}. \end{array} \right. \quad (18.414)$$

Баланс тепловой энергии:

для 1-й ступени ($s = 1$)

$$\sum_j Q_{kj1} = \sum_i Q_{Ti1} - \sum_k Q_{Tk}^{\text{np}''} - Q_{poy}^{\prime\prime}, \quad (18.415)$$

для 2-й ступени ($s = 2$)

$$\sum_j Q_{kj2} = \sum_i Q_{Ti2} - \sum_k Q_{Tk}^{\text{np}'} - Q_{poy}^{\prime}. \quad (18.416)$$

Ограничения по суммарным величинам отборов тепла на производственные нужды и теплофикацию:

$$Q_j^{\text{no}} = \sum_s \sum_i Q_{isl}^{\text{no}} + \sum_z Q_{zl}^{\text{no}}, \quad (18.417)$$

$$Q^{\text{To}} = \sum_s \sum_i Q_{is}^{\text{To}} + \sum_z Q_z^{\text{To}}, \quad (18.418)$$

где $Q_{kjs, \min}$, $Q_{kjs, \max}$ – минимальная и максимальная тепловые нагрузки котла; $Q_{Tis, \min}$, $Q_{Tis, \max}$ – минимальная и максимальная нагрузки турбины; $Q_{Tk, \min}^{\text{np}'}$, $Q_{Tk, \max}^{\text{np}'}$ – минимальная и максимальная нагрузки на входе предвключенной турбины; $Q_{poy, \min}^{\prime}$, $Q_{poy, \max}^{\prime}$ – минимальная и максимальная нагрузки на входе РОУ; Q_l^{no} – суммарный отбор тепла на нужды производства в l -й коллектор; Q_{isl}^{no} – отбор тепла с i -й турбины, s -й ступени в l -й коллектор производственного отбора; Q_{zl}^{no} – отбор тепла с z -го блока l -й коллектор производственного отбора; Q^{To} – суммарный отбор тепла на теплофикацию; Q_z^{To} – отбор тепла на теплофикацию с i -й турбины s -ступени; Q_z^{To} – отбор тепла на теплофикацию с z -го блока.

Предполагалось, что расходные характеристики и характеристики относительного прироста расхода условного топлива котлов известны. Наибольший интерес представляют характеристики турбоагрегатов, среди которых особое место занимают теплофикационные турбины, предназначенные для комбинированной выработки тепла и электроэнергии. Каждой комбинации загрузки по отборам тепла таких турбин будут соответствовать определенные характеристики. Таким образом, для теплофикационной турбины множество разных вариантов загрузки отбора тепла порождают различные расходные характеристики. За основу описания режима работы теплофикационной турбины была взята диаграмма режимов, которая достаточно точно интерпретируется кусочно-линейной математической моделью с погрешностью не более 1,5 %.

Расчет энергетических характеристик ТЭС с закрепленным отбором теплоты

Закрепление отборов тепла на теплопотребление равносильно выделению из множества расходных характеристик таких, которым соответствует заданный отбор тепла. При этих условиях расходная характеристика (см. соотношение (18.413)) может считаться функцией только одной переменной P_{is} .

Алгоритм построения расходной характеристики сводится к следующему. Поиск решения начинают с расчета исходной точки расходной характеристики ТЭС. При минимальной загрузке всех единиц оборудования ТЭС проверяются условия (18.414)–(18.418). Если условия выполняются, то такой режим загрузки ТЭС соответствует точке экономического минимума, так как абсолютный расход топлива при этом будет наименьшим по сравнению с расходными характеристиками в других точках. При нарушении этих условий проводится последовательная загрузка определенных единиц оборудования в соответствии с принципом равных относительных приращений вплоть до удовлетворения этих условий, а при невозможности их устранения исходные данные задачи признаются некорректными.

Пусть требуется построить следующую точку расходной характеристики ТЭС с электрической нагрузкой:

$$P_1 = P_{эм} + \Delta P_1,$$

где $P_{эм}$ – электрическая нагрузка, соответствующая точке экономи-

ческого минимума; ΔP_1 – шаг загрузки. Следует загружать такие единицы оборудования, чтобы при выполнении условий (18.414)–(18.418) расход теплоты в точке P_1 был минимальным. Переход в точку P_1 повлечёт за собой загрузку определенных единиц оборудования. Выражения для расчета относительного прироста расхода топлива для различных вариантов загрузки оборудования хорошо известны и ранее опубликованы в технической литературе. Выбор загружаемого оборудования должен отвечать условиям экономичности и не нарушать ограничений по их предельным нагрузкам. Аналогично осуществляется переход из точки P_1 в точку P_2 ($P_2 = P_1 + \Delta P_1$) расходной характеристики ТЭС и т. д.

При пошаговом процессе загрузки оборудования перемещение в каждую очередную точку характеристики затрат по оптимальной траектории, т. е. с минимальными затратами на расходуемое топливо, определяется посредством точного выбора загружаемых агрегатов. Этот выбор непосредственно связан с определением направления загрузки, для которого выполняется условие

$$b = \min\{b_\alpha\}, \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots, \beta, \quad (18.419)$$

где β – число вариантов загрузки оборудования. Значение индекса α , которому соответствует минимум b , указывает наиболее выгодное направление загрузки.

Расчет энергетических характеристик ТЭС с оптимизацией потребления тепловой и электрической нагрузок

Наличие нелинейных зависимостей, с которыми связаны производственный отбор, теплофикационный отбор, электрическая нагрузка и расход тепла на турбоагрегат, усложняет процесс поиска оптимального режима. В этом режиме при оптимальном режиме любое изменение электрической нагрузки ТЭС влечет за собой в общем случае изменение распределения теплового отбора между турбинами.

Было принято, что каким-либо образом определена искомая расходная характеристика ТЭС (см. рис. 18.189, а) и M – произвольная точка этой характеристики.

Тогда этой точке будет соответствовать определенный фиксированный отбор тепла между агрегатами ТЭС. Этот вариант распределения отборов зафиксирован, и для ТЭС построена расходная харак-

теристика описанным выше способом. Построенная кривая будет располагаться над искомой расходной характеристикой, касаясь ее в точке M . Для всех остальных значений мощности P этой кривой соответствующие им изменения расходов топлива будут больше, чем расход топлива для тех же мощностей на искомой расходной характеристике. Это утверждение непосредственно следует из свойств расходной характеристики – с изменением электрической мощности ТЭС изменяется распределение отборов тепла между агрегатами. Поэтому если рассматриваемый вариант распределения отбора теплоты является оптимальным для точки M , то для всех остальных точек он в общем случае не будет оптимальным. Если эту процедуру повторить для множества точек, достаточно близко отстоящих друг от друга на всем диапазоне изменения нагрузки исходной расходной характеристики, то получится множество расходных характеристик. Огибающая кривая, построенная по этим множествам характеристик, будет представлять некоторое приближение к искомой расходной характеристике (рис. 18.189, б).

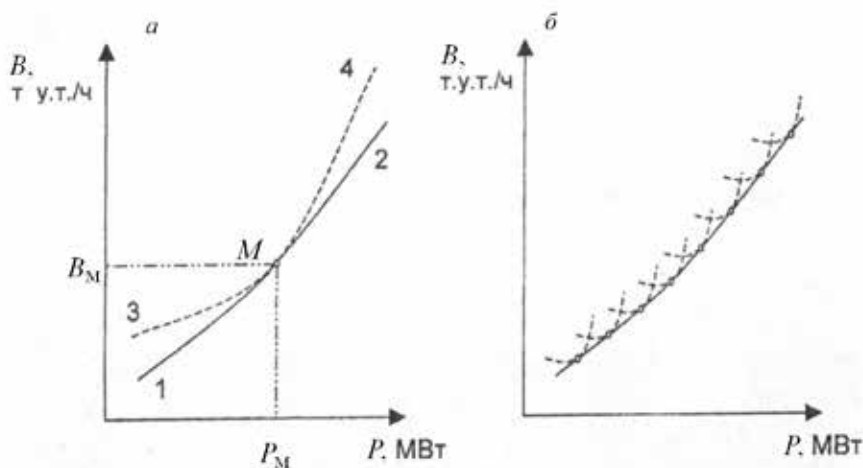


Рис. 18.189. К расчету оптимальной характеристики ТЭС:
 а – 1–2 – расходная характеристика ТЭС, построенная с учетом оптимального распределения тепловой и электрической нагрузок; 3–4 – расходная характеристика ТЭС с закрепленным отбором тепла на агрегат; б – огибающая кривая на совокупности расходных материалов

В этом случае искомую расходную характеристику можно определить как предел последовательности

$$B = \lim B_N^*, \quad (18.420)$$

$$N \rightarrow \infty,$$

построенной на множестве расходных характеристик:

$$x_1 \subset x_2 \subset x_3 \subset \dots \subset x_n \subset \dots x_N \subset \dots \quad (18.421)$$

При этом каждому множеству x_N соответствует множество вариантов распределения отбора тепла между агрегатами. Под огибающей кривой, построенной на множестве расходных характеристик X , представим такую кривую, для каждой точки которой справедливо соотношение

$$B^*(P) = \min \{B_x(P)\}, \forall P \in [P_{\min}, P_{\max}], \quad (18.422)$$

$$P_{\min} = \max \{P_{x\min}\}, P_{\max} = \max \{P_{x\max}\},$$

где P_{\min}, P_{\max} – минимальная и максимальная электрические нагрузки ТЭС, соответствующие ($x \in X$) расходной характеристике $B_x(P)$.

Таким образом, для построения последовательности минимумов расходных характеристик (18.420) требуется построить соответствующую последовательность множеств (18.422) вариантов распределения отбора тепла между агрегатами.

Выполненный анализ методов решения задач математического программирования применительно к решению поставленной задачи позволил обосновать применение метода случайного поиска, который усовершенствован введением в процесс вычислений элементов обучения. Обычно поиск минимума осуществлялся без учета предыдущего опыта с одинаковой вероятностью во всех направлениях, однако такой метод малоэффективен. Необходимо наделить алгоритм случайного поиска способностью анализировать предшествующие результаты с целью определения наиболее перспективного направления. Необходимо было перестроить вероятностные свойства поиска так, чтобы самые эффективные направления стали бы наиболее вероятными, т. е. сделать алгоритм способным к самообучению. В связи с этим первоначально определялось какое-либо благоприятное направление поиска с помощью выбора равномерно распределенных случайных чисел (метод Монте-Карло). Под благо-

приятным направлением поиска минимума целевой функции понимался такой вариант распределения отбора тепла между турбоагрегатами, для которого соответствующая расходная характеристика ТЭС входит некоторой своей составляющей в огибающую кривую. С определением благоприятного направления спуска происходит изменение закона распределения генерируемых случайных чисел, т. е. равномерный закон распределения заменяется на нормальный закон. Это приводит к изменению зоны поиска за счет того, что с наибольшей вероятностью выбираются все новые направления из окрестности наиболее благоприятного направления.

Практическое использование оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов

Применение данных моделей для решения комплекса задач оптимизации обеспечивается при наличии соответствующего информационного и программного обеспечения.

Доменные печи. Данные, использованные для решения задач распределения параметров комбинированного дутья были разделены на два класса:

- отражающий работу цеха в целом;
- отражающий работу каждой из печей цеха.

Данные, относящиеся ко второму классу по источнику и дискретности поступления информации, разделены на четыре группы:

- параметры, характеризующие конструктивные особенности доменной печи;
- переменные, получаемые от датчиков непрерывного измерения технологических параметров;
- данные о расходах, химическом составе и физических свойствах загружаемых материалов;
- параметры химического состава и массы продуктов плавки.

Выполненный анализ показал, что для информационного обеспечения решения задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов, среднее количество параметров, измеряемых и рассчитанных, например, в АСУ ТП на ОАО "ММК" на одной доменной печи, составляет около 300 при общем числе работающих доменных печей 8. Создаваемые на ряде металлургических предприятий мощные распределенные базы данных, формирование

единого информационного пространства на основе промышленных и вычислительных сетей всего аглококсодоменного производства и интеграции его в корпоративную сеть крупного металлургического комбината создают предпосылки для последующего использования разработанной модели. В математическом плане решение задач оптимального распределения природного газа не вызывает затруднений, поскольку сегодня имеется богатый выбор инструментальных средств решения задач математического программирования (Excel, MatLab, MatCAD, Maple, Mathematica).

Выполненный в работе анализ результатов расчетов оптимального распределения природного газа применительно к условиям доменного цеха ОАО ММК позволил констатировать следующее:

- при относительной стабильности работы отдельных печей и неизменном, но лимитированном значении расхода природного газа на цех только за счет его оптимального распределения между печами можно в целом по цеху сэкономить до 1,0 % кокса и повысить производство до 0,8 %;
- при тех же условиях, но при отсутствии лимитов по расходу природного газа на цех экономия кокса может достигать 3–4 % при росте производства на 3 %.

Разработанное программное обеспечение позволяет выбирать оптимальные значения параметров комбинированного дутья (расходы кислорода, природного газа) на отдельных печей цеха при изменении расходов природного газа, кислорода, состава и качества шихтовых материалов, дутьевых параметров, распределении материалов и газов на доменных печах цеха в различных технологических ситуациях работы самого цеха: максимум производства чугуна, минимум расхода кокса по цеху и т. п.

ТЭС. Разработанная модель и алгоритм решения задач оптимального распределения тепловой и электрической нагрузок между агрегатами ТЭС были положены в основу компьютерной программы «Урал – АТ/В» для АРМ «ОПТИМИЗАТОР – А». Программа была реализована в сфере Delphi и работала под управлением ОС WINDOWS, имела широкие функциональные возможности с развитым интерфейсом и обладала хорошими характеристиками процесса счета (скорость процесса вычислений).

В базе данных хранились энергетические характеристики основного оборудования 15 тепловых электрических станций Урала,

а также номинальные значения их рабочих параметров, которые составляют основу при проведении оптимизационных расчетов. В процессе расчетов предусмотрена корректировка относительных приростов расходной характеристики любого котла, что вызвано ухудшением его экономических показателей в ходе эксплуатации. Предусмотрено хранение по каждому котлу искомым характеристик относительных приростов, которые соответствуют работе котла на различных видах топлива. В базе данных собраны характеристики нескольких десятков турбин для каждой ТЭС. При этом для каждой турбины указываются:

- станционный номер турбины;
- минимальная и максимальная электрические нагрузки;
- величина производственных и теплофикационных отборов;
- температура и давление пара, температура охлаждаемой воды, давление в коллекторах производственного и теплофикационного отборов.

При отклонении (на практике) величин рабочих параметров от номинальных значений предусмотрен ввод соответствующих поправок. Пользователями могут вводиться ограничения по тепловым нагрузкам котлов, РОУ и по электрическим нагрузкам турбин, оперативно изменяться вид топлива и его цена и т. д.

Внедрение программы «Урал – АТ/В» на ряде ТЭС свидетельствовало об адекватности разработанной оптимизационной модели, корректности используемого вычислительного алгоритма, возможности адаптации модели и настройки пакета на конкретные условия функционирования системы.

Моделированием показано, что использование программы «Урал – АТ/В» обеспечивает экономию топлива в пределах 1,0–5,0 %.

Таким образом, можно подчеркнуть основные результаты работы, которые могут быть представлены следующим образом.

1. Сформулирована общая последовательность решения задач оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов для объектов в металлургии и энергетике, относящихся к классу сложных, энергоемких, энергораспределенных технических систем. Установлено, что при необходимости учета большого числа ограничений типа неравенств, при небольших колебаниях параметров относительно базовых знаний целесообразно использовать

принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к математическому, в частности, линейному, программированию. При таком подходе имеется возможность в исходной постановке в значительно большей степени учесть технологические особенности функционирования каждого агрегата в отдельности. В случае нелинейных функциональных зависимостей между оптимизируемыми параметрами, имеющими разрывы непрерывностей первого рода, а также при изменении состава оборудования в процессе эксплуатации системы и числа оптимизируемых параметров требуется использовать специальные, усовершенствованные вычислительные процедуры оптимизации систем.

2. Сформулирована общая последовательность задач оптимального распределения природного газа в группе доменных печей с учетом индивидуальных особенностей теплового, газодинамического и шлакового режимов работы доменных печей, а также их конструктивных и режимных параметров. Показано, что в рамках решаемых при этом задач целесообразно использовать линеаризованные соотношения и математическое линейное программирование.

3. Выполнена математическая постановка задач распределения параметров комбинированного дутья в группе доменных печей с учетом ограничений:

- на работу цеха по суммарным расходам природного газа, кокса, требуемому объему выплавки чугуна;
- индивидуальных технологических ограничений на каждую из печей цеха (тепловое состояние верхней и нижней части печи, газодинамический и шлаковый режимы плавки, качество выплавляемого чугуна).

4. Показано, что разработанное программное обеспечение позволяет оперативно решать оптимизационные задачи, исследовать влияние различных факторов на процесс выплавки чугуна в доменных печах, обладает возможностью совершенствования и внесения изменений с учетом тепловых газодинамических, технологических и других факторов.

5. Использование подсистемы оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов в рамках современных автоматизированных систем управления доменной плавкой позволяет в режиме «советчика» рекомендовать оптимальные параметры ком-

бинированного дутья на каждой из печей цеха при изменении параметров их работы, объема имеющихся топливно-энергетических ресурсов и конъюнктуры рынка. В результате моделирования установлено, что даже при неизменном расходе природного газа на цех, только за счет его оптимального распределения между печами можно сэкономить до 1,0 % кокса.

6. Разработан комплекс алгоритмов расчета для решения задач построения энергетических характеристик ТЭС со сложной тепловой схемой и оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузок между агрегатами с закрепленным и изменяющимся отбором тепла с целью минимизации расхода топлива. Показано, что при работе ТЭС с изменяющимся отбором тепла целесообразно для решения задач математического программирования использовать релаксационные методы случайного поиска минимума целевой функции с элементами обучения.

7. Создано программное обеспечение АРМ инженерно-технического персонала, предназначенное для расчета энергетических характеристик ТЭС с оптимизацией распределения тепловых и электрических нагрузок между агрегатами с целью получения минимального расхода топлива. Установлено, что использование программного обеспечения обеспечивает экономию топлива в пределах 1,0–5,0 %.

8. Пакет для решения задач оптимизации распределения природного газа был передан центру АСУ ОАО «ММК» для промышленного опробования, а пакет «Урал - АТ/В» был внедрен в АСУ ТП на ряде ТЭС Урала. Материалы работы также были использованы в учебном процессе в УГТУ-УПИ (УрФУ) при преподавании следующих дисциплин: «Моделирование и оптимизация в технических системах», «Идентификация и диагностика систем управления», «Идентификация и управление в сложных саморегулирующихся системах», «Управление технологическими процессами в металлургии», «Элементы теории и моделирование технологических систем в металлургии».

Представлено решение новых задач по разработке и применению математических моделей оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в сложных энергонасыщенных, распределенных комплексах (на примере доменного производства и тепловых электрических станций).

Использование разработанного на этой основе программного обеспечения в современных информационно-моделирующих системах АСУ доменной плавки обеспечивает повышение эффективности принятия решений инженерно-техническим персоналом в условиях изменений объема топливно-энергетических ресурсов, нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья и конъюнктуры рынка. Решение этих задач имеет также существенное значение для повышения эффективности функционирования ТЭС и создания современных автоматизированных систем управления технологическими процессами в сложных энергонасыщенных комплексах.

18.9.3. Алгоритмическое, программное и приборное обеспечение учета расходов теплоносителя и тепловой энергии

Данная работа была выполнена в рамках аспирантской работы Д.Л. Анисимова, в то же время являющегося одним из руководителей НПП «Уралтехнология». Работа выполнялась под руководством В. Г. Лисиенко и, конечно же, она базировалась в значительной мере на материалах и приборной базе НПП «Уралтехнология» [18.306; 18.307; 18.308].

Анализ и опыт организации учета расходов теплоносителя и тепловой энергии

Важную роль в реализации проблем эффективного использования энергоносителей играет разработка и исследование средств учета потребления энергии, эти средства являются источником данных о режимах работы энергосистем данных для справедливого расчета между потребителем и поставщиком энергоресурсов, стимулируя как того, так и другого к проведению мероприятий по рационализации использования последних. В соответствии с постановлениями правительства Российской Федерации все предприятия, организации и население должны быть оснащены подобными средствами.

Признано, что теория и методология организации учета энергоносителей в достаточной степени проработана в отношении электрической энергии. В то же время в сфере теплоэнергетики недостаточная развитость подобной базы обуславливала часто как спорность и противоречивость существующих нормативных документов, так и множественность подходов к разработке средств измерения и учета,

это в конечном итоге значительно затрудняет и замедляет процессы по реализации программ по экономии энергоресурсов, не способствуя скорейшему решению проблем энерго- и ресурсосбережения.

В связи с этим разработка методических, программно-алгоритмических и приборных средств, а также программного обеспечения для комплексной многоаспектной организации автоматизированного учета тепловой энергии и теплоносителя в водяных системах теплоснабжения (теплопотребления) являлась и является актуальной задачей.

В работе подчеркивалась необходимость разграничения вопросов измерений тепловой энергии и вопросов ее учета. Наиболее очевидным проявлением данного факта является то, что теплосчетчик и тепловычислитель, используемые де-факто как приборы учета, определяются в нормативно-технической документации только лишь как средства измерений, а существующие проекты ГОСТ на теплосчетчики регламентируют способы реализации таких собственных именно учету функций, как архивирование результатов измерений и их использование (обработка) при расчетах за теплоту. В результате сами приборные средства учета не могут использоваться именно для учета; в то же время реализуемые ими алгоритмы измерений являются по сути алгоритмами учета, т. к. содержат элементы, которые могут быть только результатом соглашения между субъектами учета, либо результатом территориально распределенных измерений, методика которых часто недостаточно проработана, а потому действительно используются «по соглашению».

В этой связи была проанализирована специфика учета, выделены четыре основных аспекта его организации – измерительный, процедурный, информационный и эволюционный, показана взаимосвязь данных аспектов (см. рис. 18.190).

Была рассмотрена разработанная базовая концептуальная модель организации учета тепловой энергии и теплоносителя, КМ ОУ (см. рис. 18.191). Модель отражает необходимость реализации всех выявленных аспектов организации учета, показывает взаимосвязь аспектов при возможности целенаправленного развития каждого из них в отдельности. Измерительный аспект представлен в КМ ОУ алгоритмами измерений, процедурный – алгоритмами обработки их результатов «в интересах учета» или алгоритмами процедур. В совокупности данные алгоритмы составляют модель измерений и процедур, являю-

щуюся структурной частью базовой модели. Следующим важным элементом КМ ОУ является информационная модель как некая совокупность протоколов (принципов, правил и алгоритмов) систематизации, идентификации и передачи данных, получаемых в результате выполнения вышеназванных алгоритмов. Введение информационной модели обусловлено необходимостью обеспечения возможности реализации измерений и процедур в различных территориально или логически распределенных зонах структуры организации учета. Очевидно, что информационная модель отражает информационный аспект; в работе было показано также, что она является и основой эволюционирования соответствующих структур в смысле роста номенклатуры и качества реализации функций рационализации энергоиспользования.



Рис. 18.190. Аспекты организации учета тепловой энергии

На основе разработанной КМ ОУ создана структурно-алгоритмическая модель интеллектуального теплосчетчика (САМ ТСЧ, см. рис. 18.192), рассматриваемого здесь не как образец практической реализации средства измерений, а как средство учета с абстрактной физической природой, т. е. имеющее любое (аппаратное, программное, конструктивное, территориальное) техническое воплощение. САМ ТСЧ включает в себя следующие логические зоны:

– зоны вторичных измерительных преобразователей (ВИП), т. е. алгоритмы обработки сигналов первичных преобразователей (ПИП), отнесенных во внешнее окружение модели;

– зоны обработки источников ввода (ОИВ), т. е. алгоритмы обработки сигналов средств ввода управляющей информации – клавиатур, touchscreen дисплеев и т. п.;

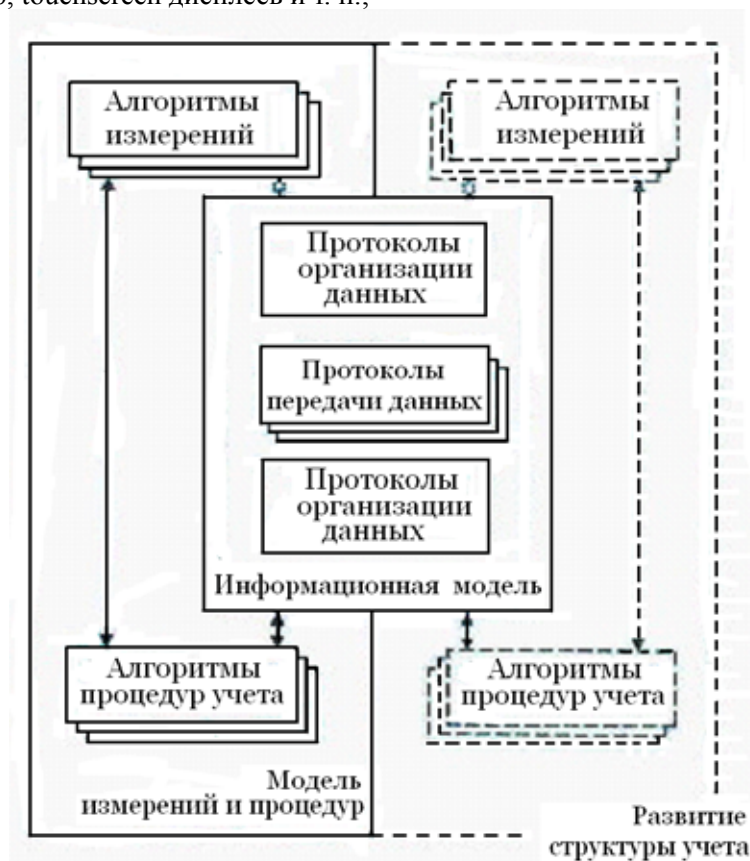


Рис. 18.191. Иллюстрации концептуальной модели организации учета

– зону структурной адаптации измерительных и процедурных алгоритмов, т. е. алгоритм выбора структуры формул измерения и учета тепловой энергии.

$$Q = \langle Q_1, \dots, Q_n \rangle, \quad (18.423)$$

где $Q_i = f(G_i, h_i)$ – значение тепловой энергии в i -м трубопроводе системы теплоснабжения, G_i, h_i – соответственно масса и энтальпия теплоносителя в i -м трубопроводе, члены $Q_j = \text{const}$ вводятся «по соглашению» через ОИВ и характеризуют значения тепловой энергии, которые невозможно или нецелесообразно измерять, но необходимо учитывать;

– зоны условных измерительных преобразователей масс и энтальпии (УИП), в которой сосредоточены алгоритмы вычисления соответствующих параметров теплоносителя на основе данных ВИП и ОИВ:

$$G_i = f(\rho_i, V) = f(T_i, P_i, V_i), \quad (18.424)$$

$$h_i = f(T_i, P_i), \quad (18.425)$$

где ρ – плотность теплоносителя, T, P, V – его температура, давление и объем, соответственно;

– зону собственно алгоритма измерений (учета) тепловой энергии Q ;

– зону алгоритмов и правил обработки и интерпретации результатов;

– измерений «в интересах учета».

Кроме того, в состав САМ ТСЧ введена информационная модель: протоколы организации данных и протоколы передачи данных, которую предложено разрабатывать в соответствии с концепцией взаимосвязи открытых систем ISO.

Отдельные функции учета или отдельные элементы алгоритмов учета могут быть распределены по различным логическим зонам общей модели, каждая из которых характеризуется сосредоточенностью в ней определенных данных и процедур по их обработке. Такая организация позволяет представить функционирование модели учета как информационное взаимодействие отдельных ее зон. Модель организации такого взаимодействия или информационная модель структуры учета показана на рис. 18.193. Здесь на уровне 1 (модель данных) осуществляется структурирование информации, представление ее в виде так называемых объектов информации, каждому из которых поставлен в соответствие некоторый идентификатор, указывающий путь доступа к объекту в общей структуре информации и несущий смысловую нагрузку. На уровне 2 (модели станций данных) реализуются протоколы обмена данными и передача объектов информации различными способами в различных физических средах между зонами информационной модели организации учета.

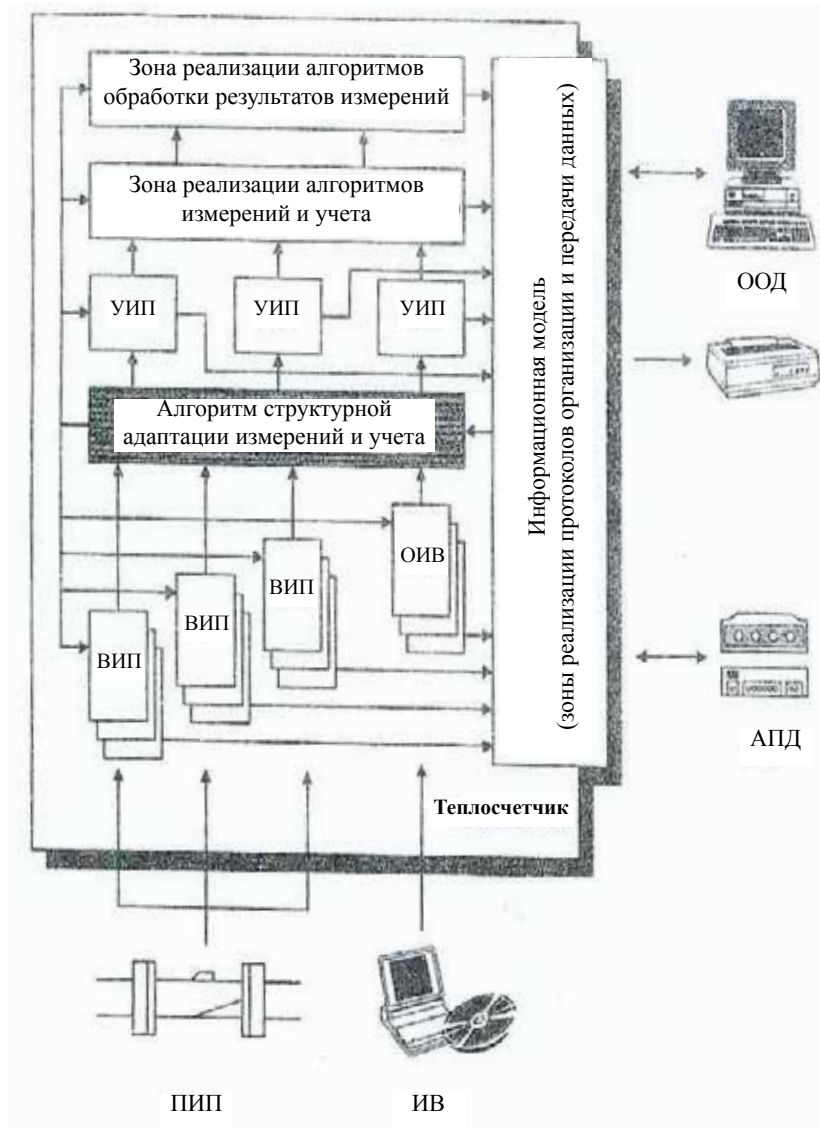


Рис. 18.192. Структурно-алгоритмическая модель теплосчетчика:
 АПД – аппаратура передачи данных; ВИП – вторичный измерительный преобразователь; ИВ – источник ввода; ОИВ – обработчик источника ввода; ООД – окончательное оборудование данных; ПИП – первичный измерительный преобразователь

Использование единой модели данных, а также предоставляемая любой из зон возможность анализа по идентификаторам объектов информации структуры и состава данных других зон обеспечивает возможность эволюционного развития функций учета путем ввода в состав информационной модели новых зон, реализующих новые функции при использовании ресурсов или данных, уже имеющихся внутри модели. Таким образом решаются вопросы эволюционного аспекта организации учета. В качестве примера здесь может быть приведен случай ввода в систему учета (теплосчетчик) регулирующего прибора, который для получения информации о состоянии объекта управления использует не собственные измерительные преобразователи, которые продублировали бы таковые теплосчетчика, а информацию (объекты информации, отражающие результаты измерений) от последнего.

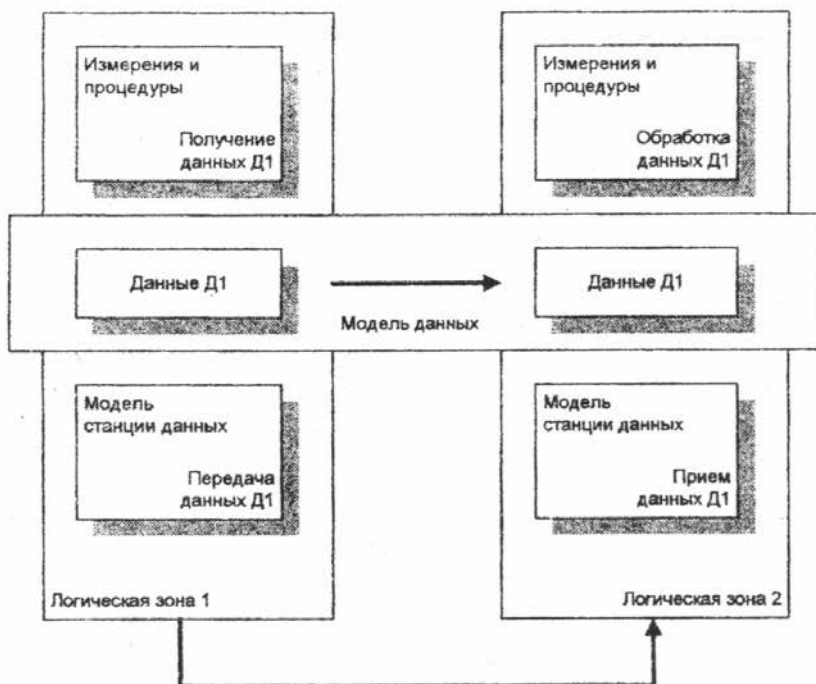


Рис. 18.193. Роль информационной модели

Д.Л. Анисимовым были предложены принципы организации данных, получаемых в результате выполнения измерительных и процедурных алгоритмов (модель данных), а также разработан и реализован на практике протокол передачи данных, в основу которого положен модифицированный интервально-маркерный метод бесконфликтного доступа к среде передачи данных в многоточечных каналах. Данный протокол составляет основу модели станции данных, которая может быть применена и применяется как составная часть модели теплосчетчика.

Реализация алгоритмического, программного и измерительного обеспечения учета расходов теплоносителя и тепловой энергии

При подходах к практической реализации отмеченных выше задач были подчеркнуты следующие важные положения.

Достаточно развит «Локальный» приборный учет тепловой энергии, технической основой которого является теплосчетчик – прибор, измеряющий параметры теплоносителя и определяющий по алгоритму значения энергии. При больших масштабах и темпах развития приборного учета парадоксальным являлось то, что в данной области была развита соответствующая нормативно-техническая база, а предлагаемые в литературе и применяемые на практике алгоритмы вычисления тепловой энергии были весьма разнообразны и порою спорны. Большинство из них к тому же были ориентированы на двухтрубные незакрытые системы теплоснабжения, каких в России и странах СНГ было сравнительно мало.

Следующая проблема возникла при интеграции приборов локальных узлов учета тепловой энергии и теплоносителя в распределенные информационные системы. Упомянутое выше отсутствие установившихся стандартов на теплосчетчики приведено к разнообразию не только их вычислительных, но и их информационных моделей, различию в методах и принципах взаимодействия с системным окружением. Это в свою очередь приводило к неоднородности и уникальности каждой системы, требовало создания оригинального алгоритмического и программного обеспечения (АО и ПО) сбора и распределенной обработки информации. Кроме того, потенциал развития системы не был заложен в ней изначально, и любое раз-

вание возможно только путем доработки, а зачастую и переработки созданного ранее АО и ПО.

Представлялось необходимым систематизировать существующий опыт организации учета тепловой энергии и теплоносителя, на основании чего разработать алгоритмическое и программное обеспечение учета, которое позволило бы эффективно решать следующие задачи:

- 1) измерение тепловой энергии и параметров теплоносителя в системах теплоснабжения и теплопотребления, содержащих произвольное количество трубопроводов в произвольной конфигурации;
- 2) осуществлять распределенную обработку результатов измерений;
- 3) развитие функций учета с использованием потенциала изначально созданных алгоритмов и программ.

Результатом работы и явилось создание требуемых алгоритмов учета тепловой энергии и теплоносителя, а также их программная реализация и практическое внедрение в продукции научно-производственного предприятия «Уралтехнология». Ниже представлены основные положения, характеризующие решение перечисленных выше задач.

Модель организации учета – модель распределенной обработки информации. Как уже отмечалось выше, для учета тепловой энергии и теплоносителя используется распределенная информационная система. Традиционно для описания таких систем применялись многоуровневые иерархические модели (см. рис. 18.194) являющиеся, по сути, лишь моделями направлений и приоритетов передачи данных. Кроме того, такие модели отражают в основном территориальную, а не логическую распределенность системы и достаточно жестко ориентированы на определенный аппаратный состав, что ясно уже из названий уровней. Взаимодействие различных процедур обработки данных, сосредоточенных в конкретных физических устройствах, сводится к обмену данными между этими устройствами по каналам связи, в связи с чем все усилия разработчика, использующего такую модель, сводятся к созданию протоколов управления звеном данных. В то же время использование для такого рода процедур эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ЭМ ВОС) позволяет независимо от характера и структуры коммуникационных каналов, а также от физической сущности

и размещения устройств, в которых сосредоточены логические зоны системы, остановиться на процедурах прикладного уровня и процессах пользователя (терминология ЭМ ВОС), собственно и определяющих модель распределенной (в логическом смысле) обработки информации. Логическая распределенность подразумевает размещение разных элементов системы в различных логических зонах, в каждой из которых сосредоточена строго определенная часть как процедуры обработки, так и самих данных, и каждая из которых связана с другими зонами при помощи определенных протоколов. Таким образом, функциональной является модель организации учета (МОУ), структура которой показана на рис. 18.195.

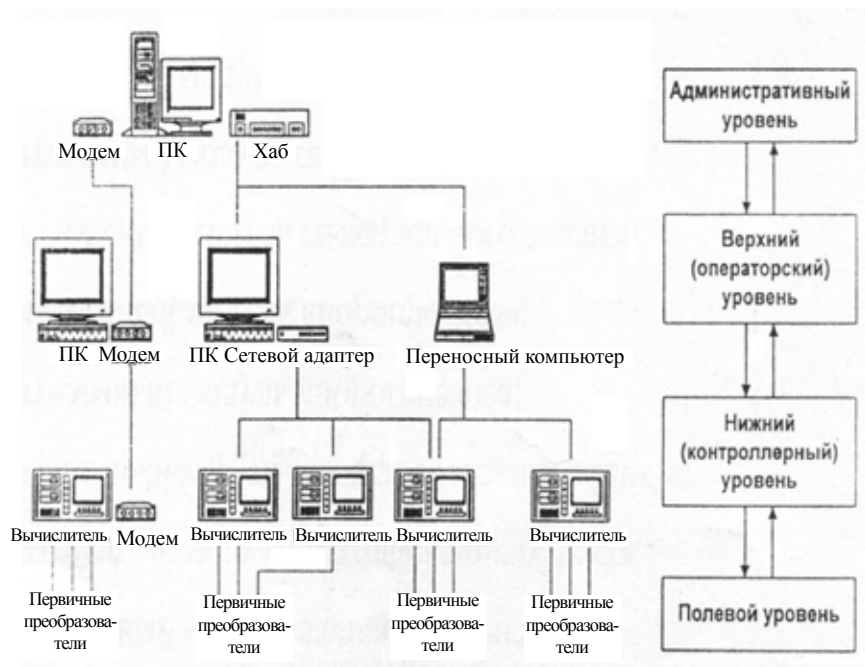


Рис. 18.194. Иерархическая модель организации учета тепловой энергии (территориально распределенная система)

Внутри модели функционируют теплосчетчики, понимаемые здесь абстрактно как логические зоны, средоточие алгоритмов и процедур по определению значений параметров теплоносителя и

вычислению тепловой энергии. Дополнительная обработка предоставляемой теплосчетчиками информации производится в других, внешних по отношению к ним, логических зонах. Сущность обработки важна только с точки зрения данных зон и определяется ими полностью. Такой подход позволяет в дальнейшем достаточно просто и без какого бы то ни было вмешательства в алгоритмы и программы уже функционирующих устройств развивать информационные функции МОУ, вводя в ее состав новые зоны обработки данных.

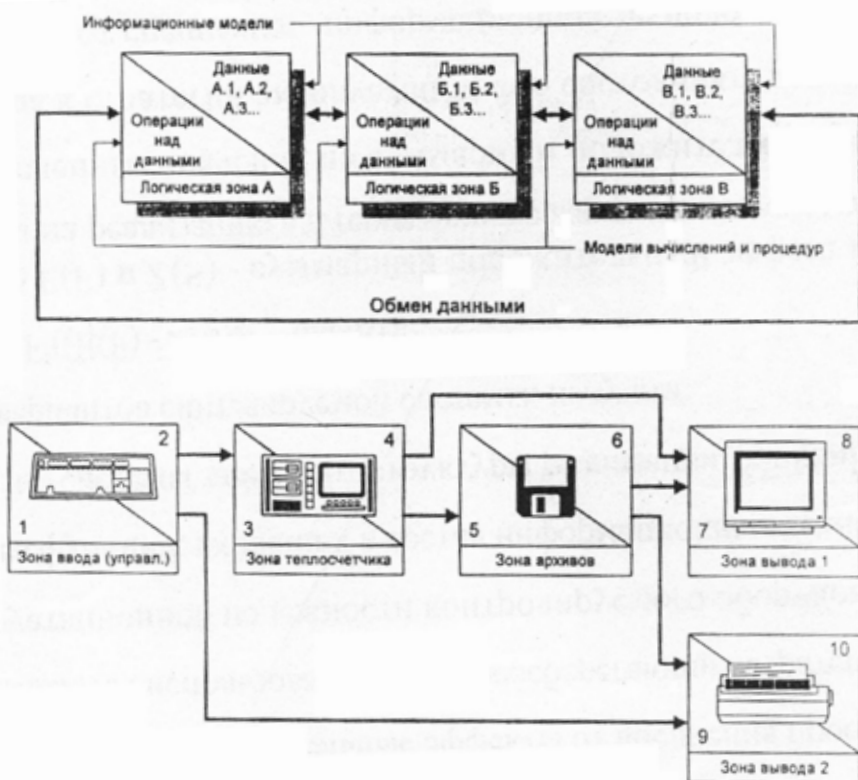


Рис. 18.195. Модель организации учета – логически распределенная система:

1 – ввод управляющей информации и ее преобразования; 2 – результаты преобразования: команды, уставки, исходные данные для расчетов; 3 – измерения и вычисления значений теплоэнергетических параметров на основе исходных данных и команд; 4 – результаты измерений и вычислений; 5 – накопление результатов измерений и вычислений – ведение архивов и протоколов; 6 – архивы и протоколы; 7, 8 – обработка данных для вывода; 9, 10 – результаты вывода

Каждая из логических зон МОУ представлена, во-первых, комплексом реализуемых в ней алгоритмов, т. е. математической моделью, характеризующей внутреннюю сущность зоны, а также моделью информационной, которая определяет ее «внешне», т. е. для других зон. Очевидно, что алгоритмы и математические модели уникальны для каждой из зон различного назначения, модель же информационная едина для всех зон МОУ, чем, собственно, и обеспечивается возможность их взаимодействия «с ходу».

Модели и алгоритмы зон теплосчетчиков. Основная функция системы (модели) учета тепловой энергии и теплоносителя – измерения соответствующих физических величин, реализуется в зонах теплосчетчиков. Значения тепловой энергии вычисляются здесь на основе результатов измерений температуры, давления и расхода теплоносителя. Разработанная модель теплосчетчика позволяет использовать различные расчетные соотношения для определения количества тепловой энергии в зависимости от структуры системы теплоснабжения (теплопотребления).

В общем случае реализуемая формула для расчета тепловой энергии Q_i , отпущенной потребителю за время $\tau = (\tau_1 - \tau_0)$ по i -й паре трубопроводов системы теплоснабжения, имеет вид [18.20; 18.24]

$$Q_i = \int_{\tau_0}^{\tau_1} [E_{1i} \pm E_{2i}] d\tau, \quad (18.426)$$

где $E_{1,2i} = G_{1,2i} (h_{1,2i} - h_{\text{хв}})$, $G_{1,2i}$ – взятый с соответствующим знаком массовый расход теплоносителя в подающем G_{1i} или обратном G_{2i} , трубопроводе i -й пары трубопроводов системы ($i = 1, 2, \dots$); $h_{1,2i}$ – значения энтальпии теплоносителя в подающем или обратном трубопроводе i -й пары соответственно; $h_{\text{хв}}$ – энтальпия холодной воды.

Формула (18.426) имеет достаточно общий характер и позволяет реализовать схему расчета тепловой энергии практически для любой конфигурации теплопункта, содержащего до 4–6 трубопроводов.

В частности, при двухтрубном подключении формула для расчета отпущенной тепловой энергии на источнике теплоты или тепловой энергии, полученной потребителем в открытой системе теплоснабжения, принимает известный вид

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} [G_1 (h_1 - h_{\text{хв}}) - G_{12} (h_2 - h_{\text{хв}})] d\tau. \quad (18.427)$$

На практике для удобства последующей обработки результатов измерений часто принимают $t_{\text{хв}} = 0$. Выражение (18.427) тогда представляется в виде

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} [G_1 h_1 - G_2 h_2] d\tau. \quad (18.428)$$

В случае закрытой системы теплоснабжения соотношение (18.427) принимает особенно простой вид, соответствующий формуле Правил учета тепловой энергии и теплоносителя

$$Q = \int_{\tau_0}^{\tau_1} G_1 [h_1 - h_2] d\tau. \quad (18.429)$$

Тот или иной алгоритм вычисления тепловой энергии формируется при определении для зоны теплосчетчика исходных данных: количества точек измерения и характера взаимозависимости трубопроводов системы теплоснабжения (теплопотребления), на которых данные точки расположены. Реально процесс такого определения сводится к процессу программирования реализующей алгоритмы микропроцессорной системы при помощи входящих в ее состав средств ввода–вывода.

Информационные модели логических зон. Возможности распределенной обработки данных, полученных в результате измерений и описаниях выше вычислений, обеспечиваются рядом базовых принципов и механизмов, являющихся основой информационной модели логической зоны МОУ. К числу таких следует отнести принцип выделения объектов информации, принцип систематической организации таких объектов, механизмы запроса абстрактного источника и вывода в абстрактный приемник, а также механизм автонастройки. Вкратце сущность названного можно описать следующим образом.

Все данные, существующие внутри МОУ, могут и должны быть организованы в виде объектов информации, каждый из которых определится собственным уникальным именем, характеризующим его назначение и применение.

Копии объектов могут передаваться между логическими зонами МОУ, но «оригинал» любого из них хранится и модифицируется только в одной определенной логической зоне.

Объекты внутри каждой зоны организованы в виде систематик (taxonomies) – термин взят из информационного проектирования. Это упорядоченные системы категорий, используемые для организации информации. Систематики можно представлять в виде деревьев, начиная с общих групп (стволов) и разделяя их на меньшие, более узкие группы. Конечным элементом систематики является объект информации, имеющий имя и состоящий из неделимых в данном рассмотрении элементов. Таким объектом может быть мгновенное значение какого-либо измеряемого или вычисляемого теплотехнического параметра (расход, температура теплоносителя, тепловая мощность), массив его архивных значений и т. п.

Зоны МОУ взаимодействуют, обмениваясь своими информационными объектами: при этом каждая из них может являться либо источником, либо приемником информации.

Приемник прибора учета может инициировать запрос требуемого ему объекта информации у неизвестного абстрактного источника, тем самым обеспечивается возможность расширения МОУ «упрощенными» моделями зон, способными использовать для реализации собственных функций вычислительные и информационные ресурсы других зон независимо от их внутренней сущности. Наибольший интерес здесь представляет то, каким образом приемник обнаруживает требуемый источник или, точнее, источник требуемого объекта информации, а также то, как приемник выясняет состав групп объектов информации у источника, проиндицировавшего необходимость вывода группы. Происходит это при помощи механизма автонастройки, который является фундаментом взаимодействия информационных моделей зон и обеспечивает развитие МОУ в целом.

Названный механизм возможен благодаря применению принципов выделения объектов информации и их систематической организации. Разработанная структура имени объекта, напрямую связанная с ветвлением деревьев систематик, а также использование единого для системы набора значений полей имен позволяют любой зоне последовательно обнаруживать в рамках всей МОУ «интересующие» ее категории объектов, постепенно сужая область поиска. Образно данный процесс можно сравнить с процессом поиска нужной книги по каталогам большой библиотеки. Наиболее наглядно

автонастройка проявляется, будучи программно реализована для обменивающихся данными теплосчетчиков (микропроцессорных устройств) и персонального компьютера. При вводе в систему нового теплосчетчика компьютер автоматически распознает и представляет на дисплее структуру и состав данных, измеряемых, вычисляемых и накапливаемых этим прибором.

Практическая реализация. Все описанные выше теоретические разработки были программно реализованы для микропроцессорных средств и использующих персональные компьютеры систем учета тепловой энергии и теплоносителя, производимых в НПП «Уралтехнология», Екатеринбург, Россия. Так, например, алгоритмы расчета тепловой энергии являлись основой ПО теплорегистратора КАРАТ (№ 15655-96 в Государственном реестре средств измерений РФ), универсального вторичного прибора, способного осуществлять учет энергии и теплоносителя в системах теплоснабжения/теплопотребления практически любой конфигурации, включающих в себя 4–6 трубопроводов (см. рис. 18.196). Также в КАРАТе реализована описанная выше информационная модель логической зоны МОУ – за счет этого прибор способен эффективно взаимодействовать с внешними устройствами обработки информации (периферией), реализующими аналогичные информационные модели. К таким устройствам относятся контроллеры вывода на печать КСП-1, КСП-2, пульт переноса данных «Луч-30».

Таким образом, актуальную для многих организаций и предприятий задачу коммерческого учета энергоресурсов помогал решать разработанный и производимый в НПП «Уралтехнология» регистратор «КАРАТ» – базовое устройство для создания теплометрических комплексов и автоматических систем учета тепловой энергии и теплоносителя.

Теплорегистратор «КАРАТ» – это универсальный вторичный прибор, предназначенный для измерения сигналов первичных преобразователей расхода, температуры и давления, преобразования измеренных сигналов в значения теплоэнергетических параметров и архивирования (почасового, посуточного и помесечного) этих значений в памяти прибора в виде сводок, включающих дату и время корректной работы теплорегистратора за период архивирования. «КАРАТ» может использоваться в качестве вычислительного и ре-

гистрирующего прибора в узлах учета тепловой энергии и теплоносителя на водяных системах отопления.

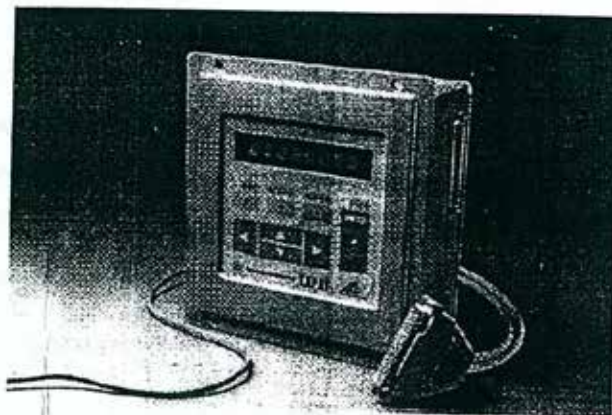


Рис. 18.196. Теплорегистратор KARAT

Характерной особенностью теплорегистратора «КАРАТ», отличающей его от большинства отечественных и зарубежных приборов того же назначения, является полная программируемость структуры в части измерения, расчета и представления выходной информации. Программирование проводится при помощи клавиатуры теплорегистратора в специальном защищенном режиме работы: по определенным правилам и предлагаемым прибором шаблонам описываются виртуальные трубопроводы, по каждому из которых далее и осуществляется вычисление и регистрация заданных теплометрических параметров. Данная особенность позволяет использовать теплорегистратор «КАРАТ» на объектах с любой стандартной или произвольной схемой подключения к теплосети без каких бы то ни было «вмешательств» в аппаратную часть прибора.

При такой гибкости «КАРАТ» является абонентским прибором, работать с которым может и неспециалист: вся архивная информация доступна в виде элементов строк отчетной ведомости, при индикации которых отображаются и мнемонические имена параметров, определенные самим пользователем.

В НПП «Уралтехнология» было разработано программное обеспечение теплорегистратора «КАРАТ», основой которого является

созданная здесь же многозадачная операционная система реального времени, ориентированная на работу с внешними удаленными источниками и запросчиками информации с использованием оригинальных протоколов канального и прикладного (в терминологии концепции взаимодействия открытых систем ISO) уровней. При оставшемся практически неизменным интерфейсе пользователя прибор приобрел несколько новых коммуникационных функций. Становилось возможным включать его в состав разрабатываемых НПП «Уралтехнология» распределенных систем автоматического учета и регулирования отпуска / потребления тепловой энергии и теплоносителя, считывать (применяя специальный адаптер) данные архивов «КАРАТа» на персональный компьютер или использовать теплорегистратор в качестве пульта для программирования не имеющих собственных средств ввода и отображения информации устройств – элементов вышеупомянутых систем.

Описанные выше принципы и механизмы обмена данными были реализованы и в ряде программ для персональных компьютеров, осуществляющих сбор и обработку информации теплорегистраторов КАРАТ. Это программы «Карат – Экспресс», «Карат – Экспресс И» и «Теплопункт».

Сфера практического применения названных устройств и программных продуктов расширялась, что доказывало жизнеспособность разработанных моделей и алгоритмов учета тепловой энергии теплоносителя.

В НПП «Уралтехнология» был реализован проект «Теплопункт» – распределенная система сбора и обработки информации для узлов учета тепловой энергии и теплоносителя на источниках теплоты и у потребителя. Реализация данного проекта являлась этапом разработки предприятием систем автоматического управления технологическими объектами, организующихся путем включения в моноканальную локальную сеть шинной топологии автономных устройств с различными функциональными возможностями и различного конструктивного исполнения. Объединяющим фактором является информация, передаваемая в сети и используемая различными устройствами различным образом. Так, любой из элементов системы может управлять или управляться другим, использовать определенным образом «чужие» ресурсы для реализации «своей доли» системных функций или предоставлять аналогичные возможности для других устройств. Такой подход по-

звolyет проектировщикам и заказчикам постепенно «наращивать мощность» системы или даже переориентировать ее на решение новых задач путем ввода в состав новых устройств без внесения каких бы то ни было изменений в аппаратуру и программное обеспечение уже функционирующих элементов, а также оперативно заменять последние с целью ремонта или модернизации.

В рамках проекта «Теплопункт» были разработаны:

- принципы создания систем вышеописанного типа;
- принципы взаимодействия устройств системы;
- оригинальный протокол взаимодействия устройств на прикладном (согласно модели взаимосвязи открытых систем ISO) уровне;
- протокол управления доступом к среде передачи данных – модификация интервально-маркерного метода;
- общие принципы создания и структура программного обеспечения устройств;
- многозадачная операционная система реального времени, ориентированная на применение в устройствах на базе микроконтроллеров, работающих в сети.

Система «Теплопункт», таким образом, своего рода инструмент для отработки новых технических решений, и принципов программирования, и ее появление на рынке оборудования узлов учета тепловой энергии и теплоносителя была весьма актуально. Система состояла из одного или нескольких – до 14 – теплорегистраторов «КАРАТ», объединенных в локальную сеть, и персональной ЭВМ, подключаемой к данной сети через адаптер. Разработанное «Уралтехнологией» программное обеспечение ЭВМ (пакет программ «Теплопункт 1.0») позволило запрашивать содержимое любого из архивов любого из подключенных к сети теплорегистраторов, выводить его на печать, а также генерировать отчеты в виде сводных таблиц.

Таким образом, в рамках данной разработки получены следующие основные результаты.

1. Разработана общая концепция организации учета тепловой энергии, которая обоснованно разрешает ряд спорных вопросов учета и может являться основой для разработки нормативно-технической базы учета.

2. Разработана структурно-алгоритмическая модель теплосчетчика, положенная в основу технических средств учета.

3. Предложен конфигурируемый алгоритм учета тепловой энергии в системах теплоснабжения произвольной конфигурации, а также способы его конфигурирования, реализованные в теплорегистраторе КАРАТ НПП «Уралтехнология».

4. Разработана информационная модель теплосчетчика, используемая в проектах НПП «Уралтехнология» при построении распределенных систем учета (написании программного обеспечения таких систем).

Разработанная концепция учета являлась своего рода основой для продвижения (внедрения) средств учета, каковыми являлись приборы НПП «Уралтехнология», обосновывая целесообразность и необходимость их применения.

При помощи технических средств, реализующих разработанные алгоритмы и использующих созданное программное обеспечение, учет тепловой энергии и теплоносителя возможен в системах теплоснабжения практически любой конфигурации в соответствии с самыми разнообразными требованиями, характеризующими различные способы применения. Разработанные средства внедрены и продолжают внедряться во многих городах России (Чита, Томск, Омск, Кемерово, Новокузнецк, Сургут, Ульяновск, Нижний Новгород, Уфа и др.), объемы производства их в НПП «Уралтехнология» возрастали. В Екатеринбурге по данным Муниципального предприятия тепловых сетей (МПТС) более трети парка приборов учета составляли именно теплорегистраторы КАРАТ.

18.9.4. Система управления освещением на примере промышленного предприятия

Данная работа выполнялась в рамках магистерской подготовки и магистерской диссертационной работы, выполненной под руководством В. Г. Лисиенко магистрантом Н.С. Яруниным*. Предварительно под руководством автора Н.С. Яруниным по указанной выше тематике выполнялись исследовательские и проектные работы.

Значимость данной разработки определяется необходимостью и в российских условиях обеспечения современных требований к системам освещения в помещениях.

* Ярунин Н.С. разработка системы управления освещением промышленного предприятия: магистерская диссертация / Н.С. Ярунин. - Екатеринбург, 2014. - 95 с.

Часто это ассоциируется с представлением о так называемом «умном доме» [18.309; 18.310]. Проблемы, связанные с освещенностью, как бы дополняют материал Т. 2, кн. 3, гл. 17 данного издания, в которых рассматривалась идея энергопассивного дома (тоже, конечно, «умного»), в которых расходуется минимум тепловой энергии.

Вместе с тем требования к системе освещения, конечно, достаточно специфичны – прежде всего это обеспечение требуемого или заданного уровня освещенности. Существенная роль отводится при этом также таким санитарным требованиям как спектральный состав света и частота мерцания. Эти требования призваны обеспечить максимальный комфорт для зрения и. как следствие, максимальную эффективность и безопасность производственных или учебных процессов. Но и конечно, значимым, как и в случае энергопассивного дома, является требование обеспечения энергетической (эксплуатационной) эффективности системы освещения.

При этом играет роль, конечно, КПД осветительных приборов. Но важна также степень интенсивности их использования: как по уровню световой мощности, так и по времени использования. Экономия энергии на освещение решает также экологическую задачу: снижение расходов топлива на электростанциях, уменьшение загрязненности окружающей среды и снижение угрозы глобального потепления [18.310].

При этом возможности энергосбережения в этой области существенны. Так только использование при освещении люминесцентных и электро-люминесцентных светодиодов увеличивает рабочий ресурс в 10-15 раз, дает экономию электроэнергии в 3–5 раз [18.311].

В рамках данной разработки решалась конкретная задача разработки эффективности системы управления освещением на примере склада ОАО «Хлебпром» с целью максимального снижения энергопотребления и создания комфортных условий для сотрудников, даже если в помещении в силу его специфики отсутствует естественное освещение. В реализации этой производственной задачи и принимал участие Н.С. Ярунин.

План помещения был предоставлен вместе с заданием на систему управления заказчиком. Основные размеры помещения, необходимые для расчета освещенности, $100 \cdot 72 \cdot 8 \text{ м}^3$.

Выбор источника света

Для обеспечения большой энергоэффективности необходимо выбрать определенный источник света, а также светильник с подходящим фотометрическим телом.

В промышленности используются следующие источники света: лампы накаливания и газоразрядные лампы – низкого давления (люминесцентные), высокого давления (дуговые ртутные люминесцентные - ДРЛ).

Выбор источника света определяется рядом факторов: характером работы, условиями среды и размерами помещения. Лампы накаливания следует применять в помещениях, для которых освещенность нормируется менее 50 лк, а также в условиях, когда не предъявляются требования к различению цветов и оттенков (свет ламп накаливания окрашивает предметы в желтый цвет).

Люминесцентные лампы (более дорогие, но и более долговечные по сравнению с лампами накаливания) следует применять в помещениях, где выполняются точные работы, а также при повышенном определении правильности различения цветов.

Следует учитывать, что свет люминесцентных ламп смещен в сторону синего цвета и придает впечатление сумеречности.

Из люминесцентных ламп в настоящее время находят применение: ЛБ – люминесцентная белая, ЛД – люминесцентная дневного света, ЛТБ – люминесцентная тепло-белая, ЛХБ – люминесцентная холодно-белая, ЛДЦ – люминесцентная дневная правильной цветопередачи.

Лампы ЛХБ, ЛД, ЛДЦ рекомендовано применять тогда, когда это обусловлено специальными требованиями к определению цвета. В остальных случаях рекомендуются лампы ЛБ.

Системы освещения

На промышленных предприятиях применяют искусственное общее или комбинированное (состоящее из общего и местного) освещение.

Предпосылками для организации общего освещения являются:

- а) возможность выполнения однотипных работ по всему помещению;
- б) высокая плотность рабочих мест;
- в) невысокая точность работ.

Комбинированное освещение устраивают при:

- а) необходимости определенного направления света;
- б) высокой точности работ;
- в) при ограниченных размерах и невысокой плотности рабочих мест.

В данном проекте важнейшим параметром при выборе источника света являлась светоотдача.

Световая отдача источника света – отношение излучаемого источником светового потока к потребляемой им мощности. В Международной системе единиц (СИ) эта величина измеряется в люменах на Ватт (лм/Вт). Она является показателем эффективности и экономичности источников света.

Выражение для световой отдачи имеет вид:

$$\eta_c = \frac{\Phi_v}{P}, \quad (18.430)$$

где Φ_v – световой поток, излучаемый источником; P – потребляемая им мощность.

Введя в рассмотрение величину потока излучения Φ_e , отношение $\frac{\Phi_v}{P}$ можно представить в виде $\frac{\Phi_v}{\Phi_e} \cdot \frac{\Phi_e}{P}$. В этом произведении первый из сомножителей представляет собой световую эффективность излучения K , а второй – энергетический коэффициент полезного действия (КПД) источника η_e . В результате исходное выражение для световой отдачи η приобретает вид:

$$\eta = K \cdot \eta_e \quad (18.431)$$

Таким образом, величина световой отдачи определяется совокупным действием двух факторов. Один из них - эффективность преобразования потребляемой источником электрической энергии в энергию излучения, характеризующаяся значением КПД, другой - способность данного излучения возбуждать у человека зрительные ощущения, определяемая величиной световой эффективности излучения.

С использованием этих показателей оценен энергоэффективный источник света – люминесцентная лампа Т5 с диапазоном регулирования 10–100 %.

Выбор светильника

Выбор типа светильников проводили с учетом условий среды, нормированной освещенности, высоты помещения, требований к качеству освещения.

Светильники можно классифицировать по следующим признакам:

- а) по характеру распределения светового потока:
 - 1) прямого света;
 - 2) рассеянного света;
 - 3) отраженного света;
- б) по конструктивному исполнению:
 - 1) открытые – в них лампа не изолируется от внешней среды;
 - 2) закрытые - в них обеспечивается изоляция лампы от внешней среды;
 - 3) влагозащищенные;
 - 4) пыленепроницаемые;
 - 5) для химически активной среды;
 - 6) взрывозащитные.

Светильники прямого света применяют в высоких цехах с темными, плохо отражающими перекрытиями. При ограниченной высоте и достаточно хорошо отражающих перекрытиях применяют светильники как прямого, так и рассеянного света.

В отношении конструктивного исполнения жесткие требования установлены только для пожаро- и взрывоопасных помещений.

В данном проекте было необходимо создание системы управления освещением. Осложнение при выборе светильника вызывало большая высота помещения – 8 м, а также узкие проходы. Характеристика, которая при этом была принята во внимание, – фотометрическое тело светильника или кривая сила света.

Одними из важнейших характеристик светильников являются кривые силы света (КСС) и соотношение потоков, излучаемых в нижнюю и верхнюю полусферы.

Как правило, светильник разрабатывается не для одного конкретного объекта или светового решения, а для типового и массового использования. Поэтому от того, как распределяется в пространстве световой поток, зависит его назначение в освещении.

Представление о симметричной и ассиметричной кривой силы света можно получить из рис. 18.197.

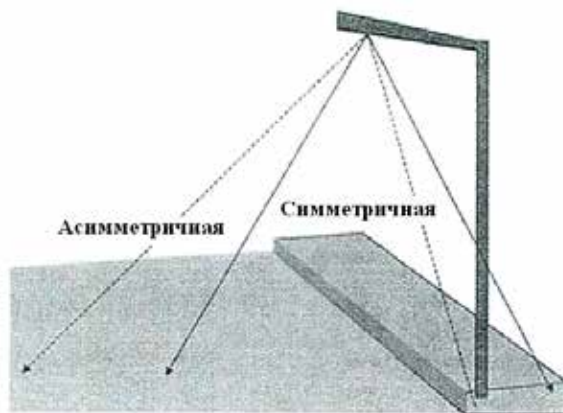


Рис. 18.197. Распределение светового потока светильника

Наиболее популярные симметричные световые потоки в зависимости от формы КСС подразделяются на семь типов от концентрированной (типа К) до широкой и равномерной (типа I и М) КСС.

Для сопоставимости данных кривые силы света обычно даются в отношении для светильника с условным световым потоком лампы (или суммарным потоком нескольких ламп) 1000 лм (см. рис. 18.198).

Для производственных помещений рекомендуется применять светильники прямого света с КСС типа К, Г, Д. Причем, чем больше высота подвеса, тем уже зона направлений максимальной силы света.

Для подсветки особых, выделенных зон внутренних архитектурных решений и деталей интерьера подходят световые приборы с КСС типа К.

Для производственных помещений рекомендуется применять светильники прямого света с КСС типа К, Г, Д. Причем чем больше высота подвеса, тем уже зона направлений максимальной силы света.

Для подсветки особых, выделенных зон, внутренних архитектурных решений и деталей интерьера подходят световые приборы с КСС типа К.

Для данного проекта необходимо было выбрать светильник с узкой КСС для освещения с большой высоты.

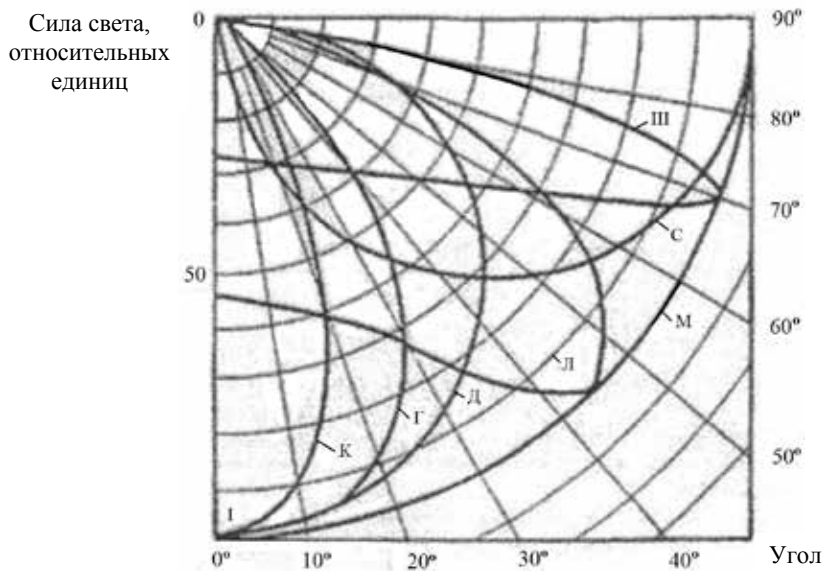


Рис. 18.198. Типовые кривые силы света: К, Г, Д, Л, Ш, М, С – тип кривой силы света для данного типа световых потоков

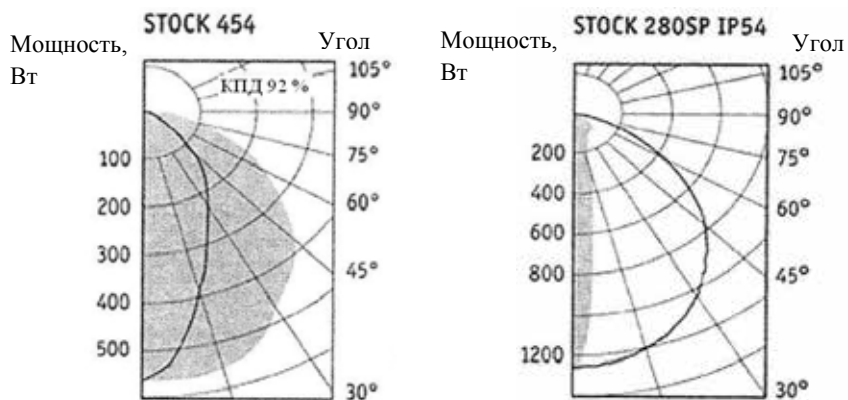


Рис. 18.199. КСС светильника Stock

При этом воспользовались светильником производства «Световых технологий» – светильником Stock (рис. 18.199).

Преимуществом его является высокая степень защиты от проникновения влаги и пыли для промышленного помещения, возможность вариации мощности светильника от 116 до 400 Вт. Узкий КСС светильника позволит осветить склад с множеством проходов и с большой высоты (см. рис. 18.199).

Выбор устройств для системы управления

Датчики движения и освещенности. Из-за сложного геометрического расположения оборудования, а также наличия естественного освещения в зоне погрузки реализация проекта осуществлена с применением датчиков движения, а так же датчиков естественной освещенности.

В проходах зоны складирования применим датчик движения. Так как наличие персонала в этих зонах непостоянно, то существует возможность экономии электроэнергии.

В частности, инфракрасный высотный датчик Хелвар 317 (Helvar) присутствия/отсутствия позволяет в автоматическом режиме управлять освещением в помещениях с большой высотой в составе системы управления освещением. Типичная область применения датчика 317: склады, производственные помещения, а также любые другие высокие помещения, где не подходят стандартные датчики.

При этом применен высокочувствительный инфракрасный датчик движения с точно настроенной линзой, позволяющий фиксировать присутствие в больших помещениях. Высота установки датчика – до 15 метров. Датчик может автоматически включать/выключать освещение в зависимости от наличия людей в составе системы управления Хелвар Digidim, или Роутер.

Зону чувствительности датчика можно подстраивать под конкретное помещение с помощью ограничительных шторок. В комплект включены две полушторки.

Данный датчик можно устанавливать в потолок, если за потолком имеется достаточно места, или же устанавливать снаружи, в монтажную коробку (заказывается отдельно, код продукта SBB-A).

Как и все «системные» датчики Helvar, датчик 317 полностью совместим с системами управления освещением от Helvar и с программным обеспечением по настройке этих систем: Designer™ и Digidim Toolbox™: при подключении к DALI шине, программы ав-

томатически находят данное оборудование и позволяют изменять настройки.

При высоте установки датчика менее 10 м диаметр охвата составляет 26 м.

В зоне погрузки необходимо организовать диммирование освещения. Если же естественного освещения будет достаточно, то светильники будут находиться в автономном режиме. При уменьшении естественного освещения и снижении освещенности ниже 200 люкс светильники начнут разгораться пока не будет достигнут необходимый уровень освещенности.

Датчики освещенности или сумеречные датчики отвечают за автоматическое включение осветительного оборудования в зависимости от яркости естественного освещения. Широкий ассортимент устройств для различных условий применения гарантирует своевременное включение и выключение освещения в частности, это датчики CDS-A7NY Esylux.

Маршрутизатор. Для управления освещением с помощью датчиков необходим роутер, который будет запоминать режимы, при которых необходимо включение или выключение светильников, а так же дампирование. Для возможности настройки режимов через панель управления необходимо выбрать и ее. Одним из важнейших параметров при выборе роутера является количество адресов. Так как в светильниках Stock, выбранных для данного проекта, имеется по 2 DALI PPA соответственно на каждый светильник необходимо по 2 адреса Digidim 910:

DALI сеть маршрутизатор Digidim 910;

910 Digidim маршрутизатор использует подключение к Ethernet (10/100 Mbps) как к магистральной сети.

Базовая функциональность доступна «вне коробки» без какого-либо программирования.

Дизайнер и программное обеспечение компании Helvar реализует функциональное программирование маршрутизатора.

Система обеспечивает энергосберегающие функции с помощью датчика присутствия и постоянной функциональности света.

Панель управления. Панель управления необходима для программирования DALI устройств, а также настройки роутеров.

Выбранный модуль LM-EG является полнофункциональным модулем для управления, программирования и настройки системы.

Функциональные возможности модуля: индивидуальное управление всеми группами светильников в системе и каждым светильником в отдельности: включение/выключение; диммирование; индивидуальное управление всеми группами жалюзи в системе и каждой жалюзи в отдельности; вертикальное движение вверх/вниз; изменение угла поворота ламелей; индивидуальное управление всеми остальными типами устройств в системе.

Организация и эффективность

Для организации эффективного управления системой освещения производственного цеха было необходимо реализовать возможность управления каждым из 204 светильников. Задача осложнялась требованием по проведению модернизации без остановки производства. Нужно было соблюсти условие максимального использования существующей проводки системы освещения и минимальной стоимости модернизации для достижения наилучших показателей по окупаемости.

В частности, для ОАО «Хлебпром» была разработана концепция, внедренная с соблюдением всех требований. Для включения и отключения каждого светильника использовались датчики движения от компании ESYLUX. Все модули объединены в сеть и подключены к существующей системе диспетчеризации на базе Digidim 910. В соответствующих местах установлены датчики освещенности и присутствия, что позволяет в автоматическом режиме включать освещение в зависимости от того, находится ли в данном месте люди или машины, а также в зависимости от уровня освещенности и присутствия людей. Оператор может настраивать алгоритм включения каждой лампочки в зависимости от изменения условий или включать и отключать каждый светильник по отдельности.

В результате внедрения гибкого алгоритма управления светильниками удалось снизить потребление электроэнергии на освещение цеха в два раза.

Наряду с энергосбережением, использование системы управления освещением позволяло решить целый ряд других задач на объекте, а именно система:

- 1) создает комфортные условия работы для сотрудников, даже если в помещении отсутствует естественное освещение;

- 2) обеспечивает удобство управления режимами освещения;
 - 3) значительно снижает затраты на внесение изменений в проект.
- Проект был реализован с большим экономическим и социальным эффектом.

18.9.5. Концептуальное моделирование, техническая диагностика и вибромониторинг энергетических объектов

Данные разработки выполнялись под руководством В.И. Кузякина при участии и консультациях авторов, с участием А.Р. Харисова. Активное участие в разработке и внедрении принимали сотрудники Тюменской ТЭЦ-2 В.П. Богомолов, В.Н. Баранов, А.А. Бессчастной и др. [18.311–18.316].

Разработка связана с системами именно диагностики. Как известно, системы диагностики (СД), которые относятся к классу измерительных систем, предназначены для контроля, диагностирования, сертификации, индексации, распознавания и мониторинга состояния наблюдаемых объектов.

Диагностика – это инструментальное (и с помощью расчетов) обследование объектов диагностики с последующей системной обработкой точного диагноза о состоянии объектов. Большая роль при построении диагностических систем отводится моделированию объектов и возможному применению методов индексации.

Главной отличительной особенностью моделирования СД-систем от САУ является то, что системы САУ, какими бы законами управления они не были наделены (программное управление, управление по возмущениям или моделирование с обратными связями), требуют разработки математической модели в виде единого уравнения, куда входят передаточные функции, как объекта управления, так и собственно системы управления.

Для СД-систем, которые при любой технологии всегда являются разомкнутыми, объект наблюдения и система контроля (диагностики, идентификации, диагностики мониторинга) всегда требуют построения собственных моделей. При этом должны разрабатываться и использоваться как статические, так и динамические или имитационные модели. В работе использовалась система вибродиагностики.

Концептуальное моделирование и теория шкал

В разработках В.И. Кузякина с соавторами значительное внимание уделялось вопросам концептуального моделирования. При этом отмечалось, что разработка программных продуктов требует математического моделирования объектов программирования. В рамках теории сложных технических многие авторы в области моделирования единодушны в том, что концептуальные модели как смысловые структуры понятий и их отношений для некоторых предметных областей знаний весьма полезны. Они позволяют формализовать процедуры создания математических моделей, с помощью которых затем разрабатываются пакеты программ, реализующие, например, информационные технологии контроля и диагностики состояния объектов.

Теоретические основы сложных технических систем предполагают обязательное существование концепции систем данного класса. Главными компонентами концепции системы являются цель ее создания и достигнутый или ожидаемый результат. Анализ/синтез концепции как первый этап исследования системы касается ее конструкторских технологических, энергетических, информационных и прочих аспектов изготовления, а также климатических, экологических, организационных производственных и других аспектов ее функционирования. Концепции сложных технических систем всегда вербальны и формализуются математическими или концептуальными и математическими моделями в зависимости от выбранного метод моделирования.

Концептуальные модели, в отличие от концепций, всегда представляются на дескриптивном (формализованном) уровне описания.

Концептуальные модели позволяют выделить наиболее значимые функции концептуально представленной системы, уточнить свойства взаимодействия и взаимосвязи ее элементов, выделить наиболее существенные из них и определить множества искомых параметров и аргументов. Концептуальные модели позволяют, если это требуется, провести аппроксимацию задач исследования систем общеизвестными методами. В этой связи можно утверждать, что концептуальная модель есть формализованная концепция.

Построение концептуальной модели как второй этап исследования сложной технической системы начинается с рассмотрения ее под каким-либо углом зрения, выбранным в соответствии глав-

ной целью исследования. При этом в соответствии с выбранными методами моделирования может быть создано большое число концептуальных моделей одной и той же системы. В представлении данной научной школы удобным и весьма продуктивным методом построения концептуальных и математических моделей, а затем и программных комплексов для автоматизированных систем контроля и диагностики состояния сложных энергетических объектов, таких как турбогенераторы, асинхронные агрегаты, трансформаторы и т. п., является использование для этих целей теории шкал (рис. 18.200).



Рис.. 18.200. Концептуальная модель программного комплекса контроля и диагностики состояния (ПККДС) асинхронных агрегатов:

ШУД – шкала управления данными; ШСХД – шкала сбора и хранения данных; ШУ БД – шкала управления базами данных; ШСП – шкала связи с прибором; ШРЧС – шкала расчета частоты скольжения; ШОСС – шкала определения статуса состояния; ШДС – шкала диагностики состояния; ШИН – шкала идентификации неисправностей; ШКП – шкала корреляции параметров

В основе теории шкал лежит теоретико-множественный аппарат отношений. В теории шкал исследуются различные свойства разнообразных объектов. Простейшим отношением между двумя свойствами является субъективное суждение о том, что одно из них больше (меньше) другого. Если ввести еще и третью оценку, лежащую между двумя первыми, то оценку каждого из первых двух

можно определять отношением к третьему. Эти отношения поддаются математическому описанию на языке теории отношений. Диагностика состояния объекта зависит от состава контролируемых параметров и элементов контролируемых объектов. Для программного комплекса контроля и диагностики состояния (ПККДС), например, асинхронных агрегатов это могут быть: шкала расчета частоты скольжения, шкала определения статуса состояния объекта, функция диагностики состояния, шкала идентификации неисправностей, шкала корреляции параметров и т. д. (см. рис. 18.200). Как видно из рис. 18.200, входными параметрами ПККДС технологического компьютера являются принятые из коллектора/сборщика спектры $S(w)$, $t-Ti$, которые затем хранятся в базе диагностических данных технологического компьютера.

Инженером-диагностиком может быть востребована любая из имеющихся функций, описанная шкалами пакета анализа диагностических данных. Входными параметрами таких шкал являются накопленные в базе данных спектры $S(w)$, $t-nTi$ на любую дату ранее выполненных замеров, число которых равно n . Выходными параметрами этих шкал являются документы в виде протоколов, номограмм, графиков и таблиц.

Метод моделирования систем с помощью теорий шкал

В.И. Кузякиным было предложено с помощью шкального метода моделирования систем осуществлять построение концептуальных и математических моделей объектов и процессов, в частности, при вибродиагностики технического состояния объектов. Типичным объектом исследования в рамках применения вибродиагностики были выбраны тягодутьевые агрегаты с асинхронным приводом (далее для краткости - асинхронные агрегаты): дымососы, дутьевые вентиляторы и дымососы рециркуляции газа ТЭЦ средней мощности.

При диагностировании каждый агрегат рассматривался как единая конструкция, состоящая из следующих элементов: асинхронный электродвигатель, валопровод и крепление агрегата к фундаменту.

На рис. 18.201 приведены контролируемые элементы конструкции, точки съема (1, 2,...) и направления съема (ART) вибрационных параметров дымососа. На корпусе асинхронного двигателя находятся три точки замера вибро-информации. Вызвано это тем, что приходится снимать

информацию в различных диапазонах частот. Так, для определения частоты скольжения, необходим диапазон частот от 0,2 Гц до 40 Гц. Для контроля общего состояния электромагнитной системы двигателя необходим диапазон частот от 5 Гц до 1000 Гц, а для контроля вентиляторов двигателя – диапазон частот от 10 Гц до 2000 Гц.

С учетом выбранных для контроля конструктивных элементов, точек и направлений замеров вибрации, а также технологических (H_p) и температурных (T_p) параметров, концептуальная статическая модель дымососа записывалась в виде:

$$K8m(D) = \{H_p + T_p + (5ART)_d + (5ART)_{ВП} + (8R)_A\}, \quad (18.432)$$

где D – асинхронный двигатель дымососа; ВП – валопровод; A – крепление к фундаменту.

Концептуальные статические модели дутьевого вентилятора и дымососа рециркуляции газов будут аналогичны модели дымососа. Их отличие заключается только в числе точек съёма информации.

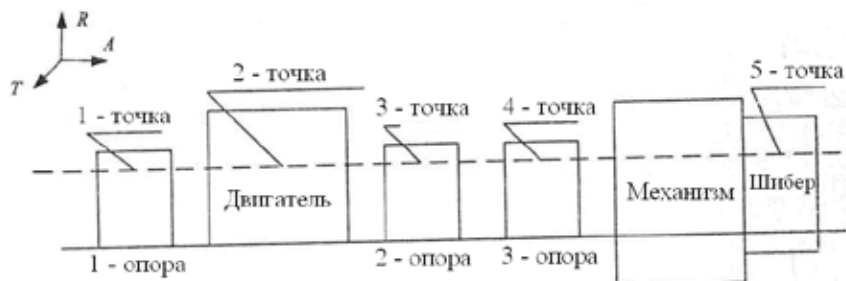
Поскольку концептуальные статические модели всех трёх типов агрегатов практически одинаковы, то можно предположить, что их динамические модели также будут идентичны.

На основе анализа опыта эксплуатации большого числа агрегатов с асинхронным приводом, для построения концептуальной динамической модели нужно было выбрать наиболее характерные дефекты, повреждения и разрушения низконадежных элементов контролируемых объектов.

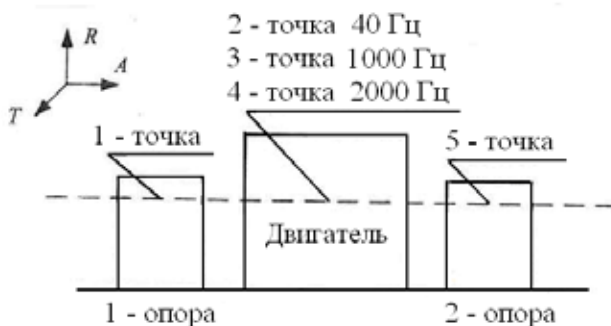
В качестве метода неразрушающего контроля был принят метод спектрального виброанализа состояния контролируемых объектов и температурные и технологические параметры. Тогда концептуальная динамическая модель технического состояния дымососа записывалась в виде:

$$K_d mTs (D) \equiv \{H_p(t), T_p(t), Vs(t)\}, \quad (18.433)$$

где вектор $Vs(t)$ эквивалентный сумме векторов: вибрации от валопровода, вибрации от электромагнитных процессов статора, вибрации от электромагнитных процессов ротора, вибрации от процессов проскальзывания ротора, вибрации от системы охлаждения двигателя и вибрации от дополнительных источников вибрации, вызванной неисправностями агрегата.



а



б



в

Рис. 18.201. Точки и направления съёма диагностической информации на низконадёжных элементах дымососов:

- а) синхронный двигатель дымососов; б) валопровод дымососов;
- в) крепление дымососов к фундаментам

Представлена концептуальная статическая модель системы контроля и технического состояния (СКТС) агрегатов с асинхронным приводом, с помощью теории шкал. При задании функционального состава СКТС, определяется структура шкал СКТС (см. рис. 18.202).

На рис. 18.202 представлены: ШМК – шкала метрологического кодирования; ШЦИ – шкала цифровых измерений; ШБПФ – шкала быстрых преобразований Фурье; ШДП – шкала дополнительных параметров; ШСХДр – шкала сбора и хранения данных прибора и ШСХДк – шкала сбора и хранения данных компьютера, соединяемые через RS-232; ШРСС – шкала расчетов скорости скольжения ротора; ШДС – шкала диагностирования состояний; ШИН – шкала идентификации неисправностей; ШГП – шкала генезиса параметров; ШПП – шкала прогнозирования параметров; ШКП – шкала корреляции параметров; $x(t)$ – входной сигнал вибрации в точке съема информации; T_p – дополнительные технологические и температурные параметры соответственно; $ДП(t)$ – выходные параметры коллектора / сборщика и одновременно входные параметры технологического компьютера. Выходными параметрами шкал, реализованных на технологическом компьютере, являются: R_{psc} – результат расчета скорости скольжения ротора; R_{dc} – результат диагностики состояния объекта; $R_{ин}$ – результат идентификации неисправностей; $R_{гп}$ – результат генезиса параметров; $R_{пп}$ – результат прогноза параметров; $R_{кп}$ – результат корреляции параметров.

В дескриптивном виде концептуальная статическая модель СКТС также может быть представлена множеством шкал:

$K_s m (СКТС) = \{ШМК, ШЦИ, ШБПФ, ШДП, ШСХДр, ШСХДк, ШРСС, ШДС, ШИН, ШГП, ШПП, ШКП\}$.

Следовательно, концептуальная дескриптивная статическая модель СКТС является структурой функциональных модулей СКТС, представленной структурой шкал.

Была построена динамическая дескриптивная модель СКГС агрегатов. Согласно теории шкал любая шкала может быть представлена в виде:

$$Шi = \{E, N, \psi\}i,$$

где E – эмпирическая система с отношениями; N – числовая система с отношениями; ψ – алгоритм отражения E на N .

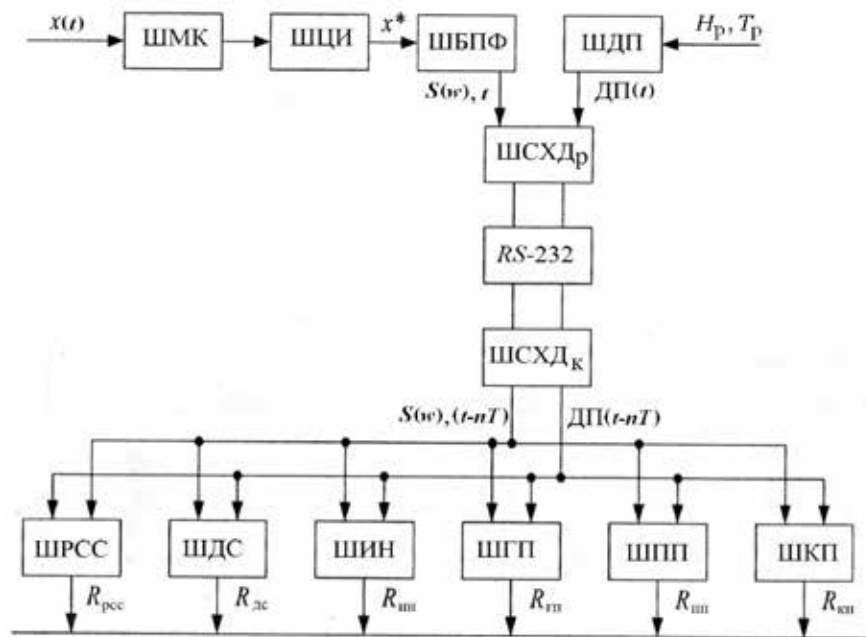


Рис. 18.202. Концептуальная статистическая модель системы контроля диагностики и мониторинга (СКДМ)

Тогда концептуальная динамическая дескриптивная модель коллектора/сборщика реализованного с помощью сигнального микропроцессора – $K_d m(KC)$ может быть представлена следующим выражением:

$$K_d m(KC) \equiv \{(x(t), H_p, T_p) ((S(w), t) ДП(t)), \psi^{KC}\}, \quad (18.436)$$

где $\psi^{KC} = \{\psi_1, \psi_2\}$; ψ_1 – алгоритм дискретизации, квантования, оцифровки и формирования спектра входного сигнала $x(t)$; ψ_2 – алгоритм присвоения даты и времени замера дополнительным параметрам H_p, T_p .

Аналогично можно было построить концептуальную дескриптивную динамическую модель для второй части системы контроля, реализованной на технологическом компьютере $K_d m(TK)$:

$$K_d m(TK) \equiv \{(S(w), t-nT), ДП(t-nT)\} \times (R_{РСС}, R_{ДС}, R_{ИН}, R_{ГП}, R_{ПП}, R_{КП}) \Psi^{TK}, \quad (18.437)$$

где $\Psi^{TK} = \{\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6\}$, алгоритмы: ψ_1 – расчета частоты скольжения ротора; ψ_2 – диагностирования технического состояния контролируемых объектов; ψ_3 – распознавания неисправностей; ψ_4 – генезиса параметров; ψ_5 – прогнозирования параметров; ψ_6 – корреляции параметров.

Концептуальная динамическая модель всей системы контроля технического состояния асинхронных агрегатов $K_d m(CKTC)$ будет представлять собой совокупность динамических моделей коллектора/сборщика и технологического компьютера:

$$K_d m(CKTC) \equiv \{K_d m(KC), K_d m(TK)\}. \quad (18.438)$$

Или в развернутом виде:

$$K_d m(CKTC) = \{((x(t), H_p, T_p) ((S(w), t), ДП(t)), \Psi^{KC}, ((S(w), t-nT), ДП(t-nT))) \times (R_{РСС, ДС}, R_{ИН}, R_{ГП}, R_{ПП}, R_{КП}) \Psi^{TK}\}. \quad (18.439)$$

Таким образом, концептуальная динамическая модель системы контроля технического состояния агрегатов с асинхронным приводом представляет собой информационную технологию диагностики и мониторинга технического состояния этих агрегатов.

Следует отметить, что концептуальное моделирование в рамках теории шкал (теории множеств и отношений) позволяет формализовать концепцию систем контроля технического состояния агрегатов с асинхронным приводом в виде структуры функциональных подсистем, представленной структурой шкал, а затем и в виде их статических и динамических моделей. При этом концептуальная статическая модель объекта является маршрутом (схемой) съема диагностической информации, а концептуальной динамической моделью объекта является статус его состояния.

Техническое состояние энергетических объектов вообще и агрегатов с асинхронным приводом, в частности, зависит от процессов деградации технического состояния фундамента, фундаментных плит, фундаментных рам, валопровода, опор, подшипников, корпуса, статора, ротора и элементов крепления активного железа и обмоток статора. Оно также зависит и от процессов нагружения и

восстановления, которые, в свою очередь, зависят от стратегий технического обслуживания и ремонтов наблюдаемого оборудования и методов неразрушающего контроля.

Поэтому математическую модель определения статуса технического состояния j -го конструктивного элемента наблюдаемого объекта на конкретное время проведения замеров, с учетом концептуальной динамической модели объекта можно представить так:

$$M_{\text{mod}}(Ts(t))_j = \left(\left(\sum_K \sum_N \sum_L (A, f) \right) \Phi \left(\sum_H H_p \right) \Phi \left(\sum_T T_p \right) \right), \quad (18.440)$$

где (A, f) – амплитудно-частотные характеристики для K точек, L линий и N направлений измерения виброспектров – $V_s \equiv (A, f)$; H_p – вектор всех H технологических параметров; T_p – вектор всех T температурных параметров; Φ – оператор векторного суммирования.

Получаемые с помощью рассмотренной модели результаты замеров служат исходными данными для решения задач контроля, диагностики и прогнозирования технического состояния наблюдаемых объектов.

Модели элементов информационно-измерительных систем

Модели объектов контроля. Концепция сложного технического объекта формализована с помощью атрибутивного моделирования концептуально представленных систем. Характерный пример – турбогенератор атомной или тепловой электрической станции средней мощности.

Определяется предназначенность системы контроля и диагностики (СКД) турбогенератора. Определяются цели и средства их достижения. Главной целью создания СКД турбогенераторов является увеличение выработки электрической и тепловой энергии за счет сокращения аварийных простоев из-за отказов оборудования турбогенератора – Ta и простоев из-за технического обслуживания и ремонтов – Tr , поскольку объект является восстанавливаемым. Анализ балансово-временной модели позволяет определить положительные эффекты от использования СКД турбогенераторов в виде увеличения выработки тепла и электроэнергии, которая достигается за счет внедрения информационной технологии контроля и диагностики.

Оценивается полиформность объекта. Рассмотрен турбогенератор с механической (конструктивной) и информационной точек зрения. Важны при этом особенности его низконадежных элементов и информация о возникновении и распространении в них вибрации, поскольку в качестве метода неразрушающего контроля, диагностики и мониторинга состояния турбогенератора выбран спектральный анализ вибрации.

Определяется иерархичность элементов турбогенератора. В качестве макросистемы использована производственная деятельность электростанции, на которой установлен турбогенератор. В качестве собственно системы, естественно, выбран турбогенератор, а в качестве микросистемы рассмотрен турбовозбудитель, в состав которых входят множество вспомогательных агрегатов и подсистем, состоящих из сборок и конструкций, которые, в свою очередь, состоят из узлов и деталей. Если поиск неисправностей возбудителя проводится с глубиной поиска до деталей, то иерархическая концептуальная модель турбогенератора будет пятиуровневой. Концептуальная иерархическая модель в виду ее простоты и очевидности не приводится. Далее рассмотрен только турбовозбудитель и его элементы.

Была рассмотрена статико-динамичность турбовозбудителя, для чего вначале оценена его концептуальная статическая модель. Концептуально контролируемый объект можно было представить как множество X взаимосвязанных контролируемых элементов – x_i , при этом, $X = \{x_i\}$; $i = \{1 - m\}$, где m – число контролируемых элементов. Число таких элементов определяется на основании их кластерного анализа по показателям надежности и представляет собой ансамбль низконадежных компонент – АНК. Тогда концептуальная статическая модель возбудителя определится следующим образом:

$$X = \{\text{АНК}\}. \quad (18.441)$$

На рис. 18.203 приведены основные узлы турбовозбудителя типа СТВ-300, для которых выполняется контроль технического состояния по методу спектрального анализа вибрации.

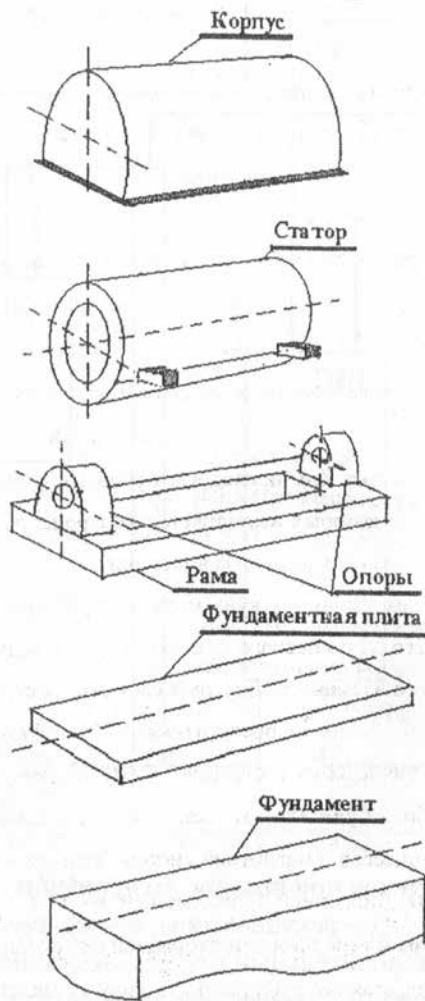


Рис. 18.203. Элементы
контроля турбовозбудителя
и узлы вибрации
турбовозбудителей
типа СТВ-300

Была построена динамическая модель турбовозбудителя с позиций контроля его технического состояния по методу спектрального анализа вибрации его элементов. Концептуальная динамическая модель вибросостояния турбовозбудителя $V_s(t)$ эквивалентна его техническому состоянию – $T_s(t)$. Исходили из того, что вибрация турбовозбудителя возникает из-за вращения его ротора, электромагнитных процессов в магнитной системе статора и ротора, а также системы охлаждения. Вибрацией, возникающей из-за влияния на

возбудитель роторов турбины и генератора, и вибрацией от соседних турбогенераторов, которая передается по фундаменту, вследствие ее малого уровня, пренебрегали. Все остальные источники вибрации, обнаруженные во время контроля, будут рассматриваться как дополнительные, возникающие в элементах возбудителя из-за накопленных дефектов и повреждений и/или отказов и разрушений. Тогда с учетом изложенного выше, концептуальная динамическая модель вибросостояния турбовозбудителя, эквивалентная его техническому состоянию была записана в виде соотношения

$$K_d m V s(t) = (V_{vp}(t) + V_{st}(t) + V_{rt}(t) + V_{so}(t) + V_{di}(t)), \quad (18.442)$$

где $V_{vp}(t)$ – вектор вибрации от валопровода, $V_{st}(t)$ – вектор вибрации от электромагнитных процессов статора, $V_{rt}(t)$ – вектор вибрации от электромагнитных процессов ротора, $V_{so}(t)$ – вектор вибрации от системы охлаждения возбудителя и $V_{di}(t)$ – вектор вибрации от дополнительных источников вибрации, вызванной неисправностями турбовозбудителя.

На рис. 18.204 приведены динамические источники вибрации турбовозбудителя типа СТВ-300, которые возникают в процессе его работы.

В зависимости от способа неразрушающего контроля могут быть построены различные динамические модели вибросостояния контролируемых объектов. Наиболее широкое распространение получили точечные (поэлементные), линейные (контурные) и плоскостные (площадные) модели.

Динамические модели вибросостояния нужны для того, чтобы идентифицировать вибрацию, основных и дополнительных источников. Для этого необходимо проводить их селекцию. Особенно важны селекция тяжести, селекция вида и селекция места неисправностей. Тяжесть неисправности (дефект, повреждение, разрушение) определяется по энергетическим характеристикам общего уровня вибрации в заданной полосе частот. При этом производится сравнение замеренного параметра с предельными уровнями в зависимости от типа по диаграммы событий/состояний.

Вид неисправностей определяется по характерному виду спектральной или гармонической характеристики, а место неисправ-

ностей определяется сравнением амплитуд гармоник в точках замера, ответственных за данный вид неисправности. Чтобы точнее определить место скрытой неисправности производится виброндирование каждого элемента объекта, т. е. назначается несколько измерительных точек. Места съема вибросигналов для оценки вибросостояния возбудителя при точечном виброндировании показаны на рис. 18.205. При этом измерения вибросигналов в каждой точке (1, 2, 3, 4, 5) проводятся в трех ортогональных направлениях А, R, Т (см. рис. 18.201).

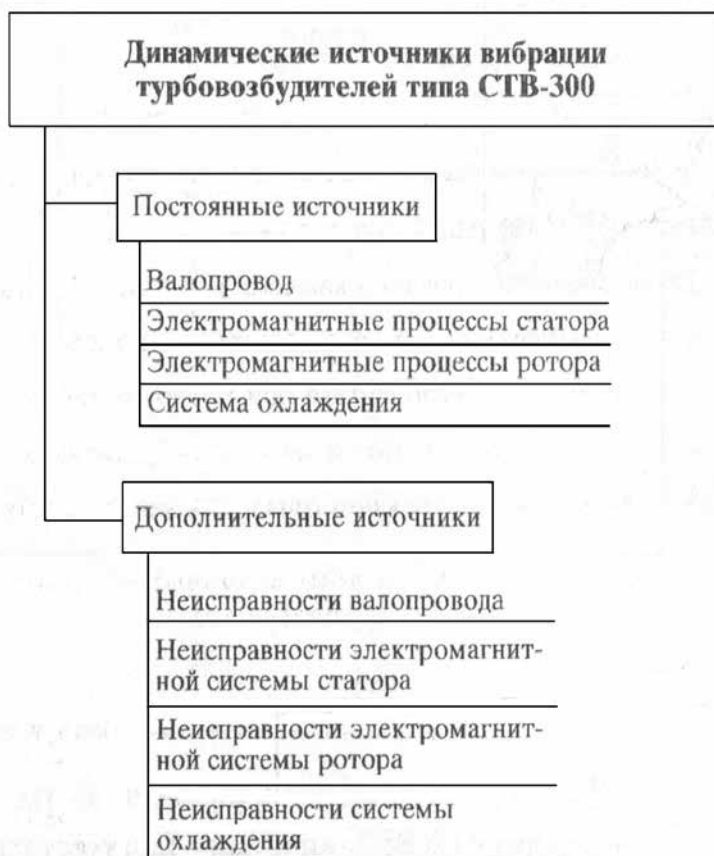


Рис. 18.204. Источники вибросигналов

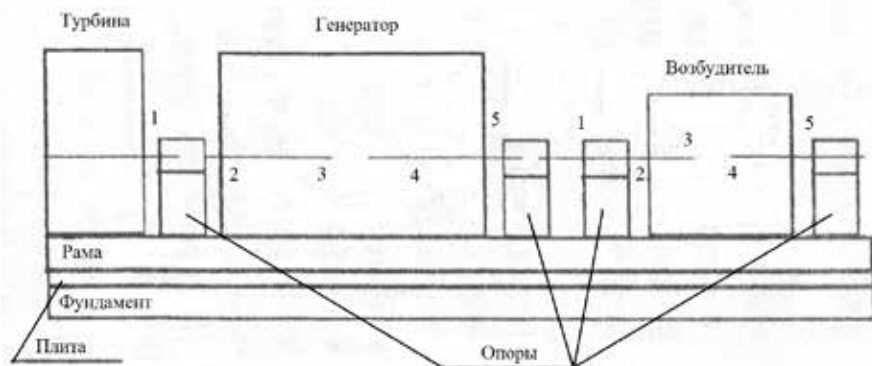


Рис. 18.205. Точки съема диагностических параметров на опорах и корпусах электроимпульсного агрегата (1–5)

В результате обработки вибросигналов получалась цифровая модель вибросостояния, которая определяет вибростатус наблюдаемого объекта (см. рис. 18.206). Вибростатус представляет собой, удобную для обозрения, графическую форму цифровой модели. При линейном виброндировании мы получаем вибростатус в форме вибросреза, проведенного через точки замера сигналов. Вибростатус определяется трижды, если выбрано три направления измерения вибрации. Для того, чтобы не нагружать график вибростатуса избыточной информацией, на него выводились не все замеренные амплитуды сигналов для частотных линий спектральных характеристик, а только гармоники, кратные оборотной частоте ротора турбовозбудителя.

Иногда в качестве состояния контролируемого объекта выводили на экран все параметры одного замера с указанием значений, превышающих нормы исправного состояния. Другими словами совмещали статус состояния с протоколом диагностирования.

Полную спектральную характеристику для любого замера в любой точке и в любом направлении можно было посмотреть на графиках одиночных спектров. Сравнительную картину нескольких спектров можно просмотреть на графиках многочисленных спектров. При этом можно просмотреть спектры для любых сделанных замеров, в одной точке для всех направлений или для одного направления, но для всех точек одновременно (см. рис. 18.208).

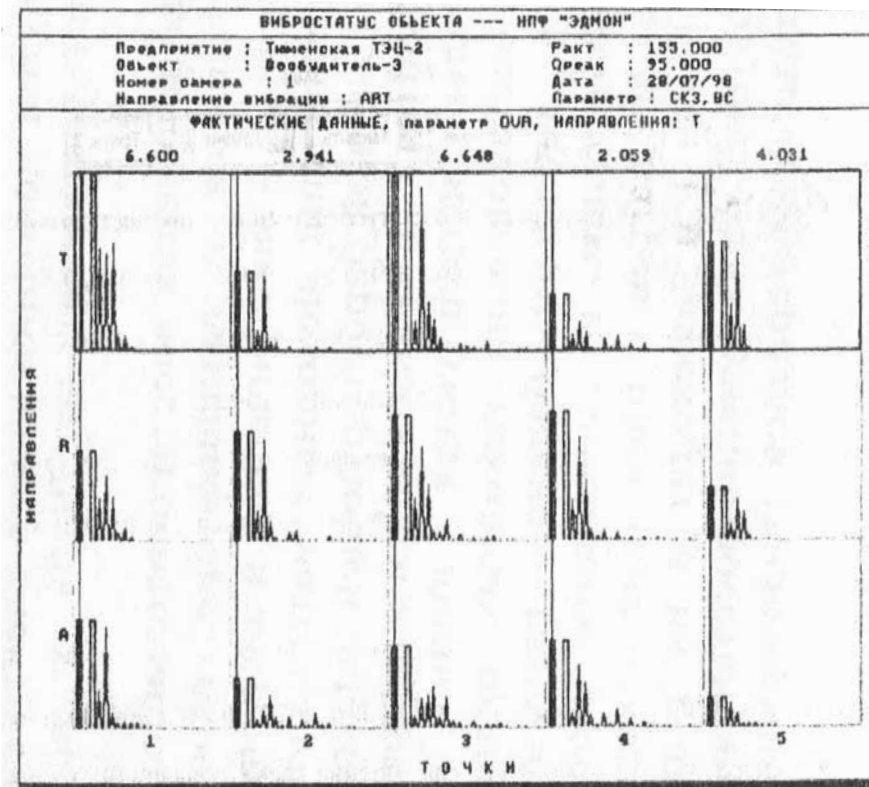


Рис. 18.206. Вибростатус состояния турбовозбудителя

Графики спектров несут в себе избыточную информацию, так как реальные спектры все же тяготеют к частотам кратным оборотной частоте турбовозбудителя. Уменьшению информационной избыточности служит гармонический анализ, при котором на графики одиночных спектров и на графики многочисленных спектров выводятся только гармоники кратные 50 гц.

Ресурсная эффективность турбогенератора определяется как разность суммарного эффекта и затрат на его достижение. Для турбогенератора это в основном сокращение времени аварийных простоев, сокращение времени проведения ремонтов, сокращение затрат на восстановление оборудования после аварий, сокращение затрат на

проведение ремонтов и т. д. Затраты определяются стоимостью системы контроля и диагностики.

Среди российских разработчиков программных продуктов, реализующих электронные (информационные) технологии диагностики и мониторинга, успешно функционировала научно-производственная фирма НПФ «ЭДМОН», возглавляемая В.И. Кузякиным. Она поставляла системы диагностики, сертификации и мониторинга для объектов энергетики, а также нефтяной, газовой и нефтегазоперерабатывающей промышленности на базе собственных информационных технологий и первичной аппаратуры российской фирмы «ДИАМЕХ» или американской фирмы «CSI». Фирма специализировалась на разработке информационных технологий, как для отдельных, так и для больших парков сложных технических объектов.

Ниже приведены данные разработок программных продуктов этой фирмы.

Пакет прикладных программ «Спектральный вибромониторинг роторных машин» («КОМПРОМИД СТО»)

Данный пакет являлся способом реализации информационной технологии диагностики, сертификации и мониторинга технического состояния сложных энергетических объектов, в котором используется методика точечного и контурного неразрушающего контроля вибросостояния синхронных турбогенераторов, турбовозбудителей, синхронных компенсаторов и синхронных двигателей. Методика может применяться и для контроля асинхронных двигателей, работающих с постоянной нагрузкой (насосы, вентиляторы, эксгаустеры).

Пакетом предусматривалась работа с различными виброспектроанализаторами, например, с виброанализатором VA 1900 американской фирмы «CSI» или с коллектором-балансировщиком AU-014 российской фирмы «ДИАМЕХ». Кроме того, в пакете предусматривается обработка собранной диагностической информации на персональном компьютере типа.

Информационная технология, реализованная указанным пакетом, позволяет создать автоматизированное рабочее место инженера-исследователя для решения задач по диагностике и мониторингу технического состояния и распознаванию накопленных поврежде-

ний в элементах контролируемых объектов. В технологии используются процедуры диагностики контролируемых объектов, для которых характерны микрокомпьютерный сбор и обработка данных, использование систем управления базами диагностических данных, наличие открытых экспертных систем распознавания неисправностей и автоматическая генерация сертификатов технического состояния, в которые входят общая оценка технического состояния объекта, протокол исключений из нормы наблюдаемых параметров и протокол определения скрытых неисправностей одновременно.

Управление пакетом осуществлялось из главного меню, которое реализует три основные функции: «Управление данными», «Анализ данных» и «Управление базами». Каждая из этих функций реализуется своими вертикальными меню блоков и субблоков рабочих программ.

Структурно пакет состоял из программы-оболочки, защищающей его от несанкционированного доступа к его ресурсам и копирования; блока программ создания, контроля и управления активной и архивными базами данных; блока программ ввода, корректировки, контроля и удаления данных; блока программ вибромониторинга (определения статуса, диагноза, генезиса и прогноза состояний); блока программ спектрального анализа; блока программ гармонического анализа, блока программ экспертного анализа, программы виброволнового анализа, а также блока сервисных программ контроля баз данных.

Для каждого объекта контроля может быть создана одна или несколько баз данных с любым маршрутом контроля. При этом могут изменяться структуры базы данных: количество точек контроля, направление измерения вибрации, тип и количество наблюдаемых параметров, единицы измерения, значения предельных уровней. Любая база может быть активна, сохранена в архиве или уничтожена.

Автоматический или ручной ввод данных, их корректировка и удаление производятся в строгом соответствии со структурой активной базы данных. Все операции ввода, корректировки и удаления осуществляются над полным набором (замером) данных.

Процедуры анализа и обработки осуществлялись только над данными активной базы. Пакетом могут анализироваться отдельные гармонические колебания (гармоники G_1, G_2, \dots, G_n) исследуемого спектра, спектральная мощность общего уровня вибрации (OVR) во

всей полосе измеряемых колебаний, спектральная мощность в полосе субгармонических (SG) колебаний и спектральная мощность наблюдаемых высших гармонических (HG) колебаний с использованием среднеквадратических ($СКЗ$), пиковых (P) и двоимых пиковых ($P-P$) величин контролируемых параметров.

Высокая чувствительность оценки технического состояния контролируемых объектов достигалась тем, что в пакете использовалась 4-х уровневая математическая модель переходов состояний объектом. Фон как нижний предельный уровень значений параметром определяет область их неопределенного состояния. Превышение одного из трех других предельных уровней 1ПУ, 2ПУ и 3ПУ хотя бы каким-нибудь одним из контролируемых параметров однозначно определяет техническое состояние объекта как НЕИСПРАВЕН; НЕИСПРАВЕН, НО РАБОТОСПОСОБЕН и НЕРАБОТОСПОСОБЕН соответственно. Только полное отсутствие пересечений хотя бы одним из всего множества контролируемых параметров предельного уровня 1ПУ определяет состояние объекта как ИСПРАВЕН.

В пакете реализовались функции определения статуса, генезиса и диагноза объекта, предназначенные для определения его прошлых и настоящего технических состояний. Кроме того, использовались функции прогноза наступления отказов контролируемых объектов с помощью трендов наблюдаемых параметров и приращений их среднеквадратических значений за период наблюдения, а также определение сроков ближайших ремонтов и обследований контролируемых объектов.

Достоверность оценки текущего прогнозируемого состояния объекта обеспечивалась использованием квазидетерминированных моделей деградации состояния контролируемых объектов, содержащих в себе детерминированную информацию о фактических величинах вектора диагностических параметров и статистически определенную область допустимых значений контролируемых параметров, которая может по мере накопления данных уточняться и корректироваться.

Широкие возможности включенного в пакет спектрального, гармонического и виброволнового анализа данных позволяли эффективно осуществлять опытным экспертам-диагностам автоматизированное распознавание возникших и развивающихся неисправностей

контролируемого оборудования. Кроме того, в пакет включена открытая экспертная система автоматического определения скрытых неисправностей. Изначально она настраивалась на распознавание неисправностей как стохастическая система с использованием ранее накопленного опыта.



Рис. 18.207. Структурная блок-схема ППП SVM-RM

В пакете использовался интерактивный интерфейс пользователя, который базируется на широком применении выпадающих и всплывающих меню, на постоянном присутствии сообщений о дальнейших, необходимых действиях пользователя и на активном использовании функциональных клавиш. Имелась возможность создавать и использовать в отчетах графические фрагменты контролируемых объектов и различные пояснительные диаграммы. Результаты выполнения пакетом всех заданий могли быть выведены на экран и принтер в форме протоколов или графиков.

На рис. 18.207 приведена блок-схема пакета прикладных программ.

Подробно спектры можно было рассматривать на графиках оди-
ночных спектров (пример рис. 18.208).

Виброспектр, рад/с

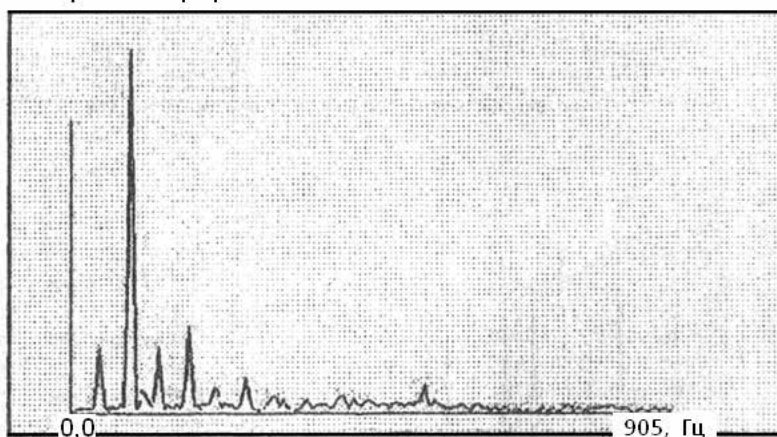


Рис. 18.208. Одиночный виброспектр в точках контроля объекта

В табл. 18.36 приведен пример протокола определения неисправностей контролируемого оборудования. В нем указаны вероятные неисправности, которые были обнаружены у наблюдаемого объекта.

Внедрение методики точечного (поэлементного) и контурного контроля технического состояния вибросостояния контролируемых объектов позволяет существенно повысить надежность наблюдаемого оборудования, снизить аварийность и расходы на ремонт контролируемых объектов.

Таблица 18.36

Протокол определения неисправностей

Предприятие:	Тюменская ТЭЦ-2
Объект	Возбудитель ТВ-3
Дата замера	17.08.1998
Обнаруженные неисправности	
Дефекты подшипников 1-ой опоры	Осевое биение
Дефекты подшипников 1-ой опоры	Горизонтальное биение
Повышенная вертикальная вибрация корпуса	У 1-ой опоры
Повышенная вертикальная вибрация корпуса	По центру корпуса

Методика прошла большую практическую отработку. С ее помощью, например, проводились диагностические работы по обнаружению скрытых неисправностей турбогенераторов Тюменской ТЭЦ-2 ОАО «Тюменьэнерго».

Методика модернизировалась в направлении расширения типов наблюдаемых объектов и в направлении большей гибкости создаваемых баз данных.

В. Г. Лисиенко участвовал в указанных разработках, а при посещении совместно с В.И. Кузякиным Тюменской ТЭЦ-2 убедился в работоспособности и эффективности установленного на ряде агрегатов ТЭЦ вибродиагностического оборудования.

Отметим возможности и широкую область применения методики - энергетика, горная, нефтяная и газовая промышленность, цветная и черная металлургия и т. д.

Таким образом, использование комплекса оборудования и интеллектуального пакета прикладных программ «КОМПРОМИД СТО» позволяет ускорить анализ, синтез и внедрение систем диагностики и мониторинга энергетического, нефтегазодобывающего, нефтегазоперерабатывающего и бурового оборудования, что, в свою очередь, позволяет существенно повысить надежность, снизить аварийность и расходы на ремонт оборудования.

На кафедре автоматики и управления в технических системах (при заведовании кафедрой В. Г. Лисиенко) в рамках курсов «Технические средства автоматики» был разработан стенд по вибродиагностике электрического двигателя (лабораторные работы осваивали и проводили В.И. Кузякин и А.Р. Харисов).

18.9.6. Источник питания для установки электронного лучевого переплава

Данная работа под руководством авторов проводилась аспирантом В.В. Соничем на Верхне-Салдинском металлургическом производственном объединении в процессе реконструкции и обновления оборудования предприятия [18.317].

Разработка источника питания высокого напряжения для установки электронно-лучевого переплава (ЭЛП) на базе электронно-лучевых пушек тлеющего разряда с холодным катодом типа ВТР-250 требовала серьёзного подхода не только к электротехнической составляющей проекта, но и к изучению физических параметров функционирования данных устройств. Особенностью мощных электронных пушек ВТР является наличие протока рабочего газа, обеспечивающего необходимое для поддержания разряда давление в разрядном пространстве пушки. При работе установки происходят пробои ускоряющего (газоразрядного) промежутка в пушке, что требует применения в мощных источниках питания соответствующих средств защиты от коротких замыканий нагрузки. Причиной пробоев являются достаточно сложные физические процессы, протекающие в технологической установке при формировании и транспортировке интенсивных электронных потоков, при их взаимодействии с объектами нагрева. Исходным процессом является повышение давления остаточных газов и паров обрабатываемых материалов при выделении энергии в технологической камере.

Каждая из двух электронных пушек установки ЭЛП имеет автономный источник питания, выполненный по схеме тиристорного ключа с нерегулируемым выпрямителем. При использовании источника питания с подобной схемой оптимальное время паузы при автоматическом повторном включении составляет 10–20 мс, при этом длительность режима короткого замыкания обычно не превышает 35 мс. Время паузы определяется, в основном, скоростью протекания переходных процессов при отключении источника.

Источник питания включает в себя повышающий трансформатор, формирующий ускоряющее напряжение 25 кВ, тиристорный ключ, выполненный по мостовой схеме, посредством которого производится коммутация первичной обмотки трансформатора. Для сглаживания пульсаций тока при переходных процессах во время

включения и отключения тиристоров, а также при развитии коротких замыканий в электронных пушках используется мощная индуктивность, подключенная параллельно тиристорному ключу. В силовую схему входят также выпрямитель и балластное сопротивление. Особенное внимание при проектировании источника было уделено разработке и отладке систем защиты. Помимо стандартной максимальной токовой защиты необходимо предусмотреть основную защиту источника от коротких замыканий в электронной пушке, вызывающих перенапряжения и динамические удары.

С этой целью в источнике питания высокого напряжения установки ЭЛП была применена трехступенчатая система защиты, которой контролируются три основных параметра, позволяющие наиболее точно определить момент развития пробоя в газоразрядном промежутке электронной пушки. Этими параметрами являются: рабочий ток в цепи питания пушки, фазные токи вторичной обмотки силового трансформатора, а также ток в цепи индуктивности на «низкой» стороне трансформатора. В рамках разработки первой схемы в процессе экспериментальных работ по отладке систем защиты был сделан вывод о недостаточном быстродействии герконового реле, которое было использовано для контроля тока в цепи питания пушки. На практике время его реагирования составило более 50 мс, что неприемлемо для ликвидации пробоя, так как неконтролируемый рост тока за этот период уже приводит к срабатыванию максимальной токовой защиты.

Вторая схема, включающая в себя трансформаторы тока, установленные во всех трех фазах вторичной обмотки силового трансформатора, и регулируемый электронный компаратор, обладает достаточным быстродействием, составляющим на практике около 20 мс, что позволило достаточно точно отследить момент развития короткого замыкания и вовремя ликвидировать связанный с этим скачок тока в источнике путём отключения тиристорного ключа.

Третья схема защиты осуществляет контроль тока, протекающего по шунту, установленному в цепи индуктивности. Данная схема не обладает высоким быстродействием, что не является необходимым условием, так как она служит для определения момента аварийного отключения источника питания при неконтролируемом росте тока в результате, например, выхода из строя основных защит.

18.9.7. Особо чистый водород

Водородная энергетика, связанная как с получением водорода, так и его использованием, охватывает широкий круг проблем. При этом применение водорода охватывает металлургию и машиностроение (защитные атмосферы), энергетику – топливные элементы, авиатранспорт (двигатели на водороде), космос (ракетная техника с использованием в качестве топлива водорода) и др.

При этом примитивным и дорогим, но достаточно распространенным методом получения водорода является электролиз воды. Прогрессивными методами получения водорода можно считать диффузионные методы.

Данная работа выполнялась в УПИ (УрФУ) и ВНИИМТе (НИИ металлургической теплотехники) под руководством П.В. Гельда, а затем Е.С. Левина, И.В. Кирноса, Ю.Н. Гука с участием авторов в ряде представлений [18.318; 18.320].

Установка для получения особо чистого водорода

В промышленности и, в частности, черной металлургии применение находит диффузионный метод разделения водородосодержащих газовых смесей с дальнейшим использованием выделенного особо чистого водорода (99,9999 об. % H_2) в технологии получения высококачественных электро-технических и конструкционных сталей. В настоящее время диффузионным методом получают особо чистый водород из диссоциированного аммиака, азото-водородных смесей и увлажненного водорода.

В связи с тем, что преобладающим видом сырья для получения водорода является природный газ, целью работы являлось создание промышленных установок для выделения особо чистого водорода из природного газа различной производительности (см. рис. 18.209).

Установка состоит из блоков: сероочистки, конверсии природного газа с водяным паром, удаления жидкого диоксида углерода и диффузионной очистки водорода. Принцип работы установки следующий. Очищенный от серы метан и водяной пар при одном и том же давлении подводятся в высокотемпературный реактор при соотношении 3-1 соответственно. При давлении парогазовой смеси не более 0,5 МПа и температуре ~ 1200 К на выходе получается газ следующего состава (об. %): CO – 12,3; CO_2 – 4,4; H_2O – 29; H_2 – 54. Для предотвращения обратной реакции газ поступает в низкотем-

пературный реактор ($T = 473 \text{ K}$), на выходе из которого прореагировавшая смесь имеет состав (об. %): $\text{CO} - 0,54$; $\text{CO}_2 - 16$; $\text{H}_2\text{O} - 17$; $\text{H}_2 - 66$. При этом для предотвращения конденсации влаги соединительные трубопроводы между реакторами прогреваются до температуры 473 K . Затем газовая смесь компримируется до давления $2,0\text{--}3,0 \text{ МПа}$. На этом этапе на установках большой производительности ($100 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ и более) целесообразно удаление диоксида углерода методом вымораживания и заправки его в виде жидкости в баллоны. При использовании такой технологии получается газовая смесь, содержащая до 98 об. \% H_2 , которая поступает в блок диффузионной очистки. Непрореагировавшие компоненты газа используются в дальнейшем для получения технологических газов или как газовое топливо, поэтому технология получения особо чистого водорода является практически безотходной и экологически безопасной.

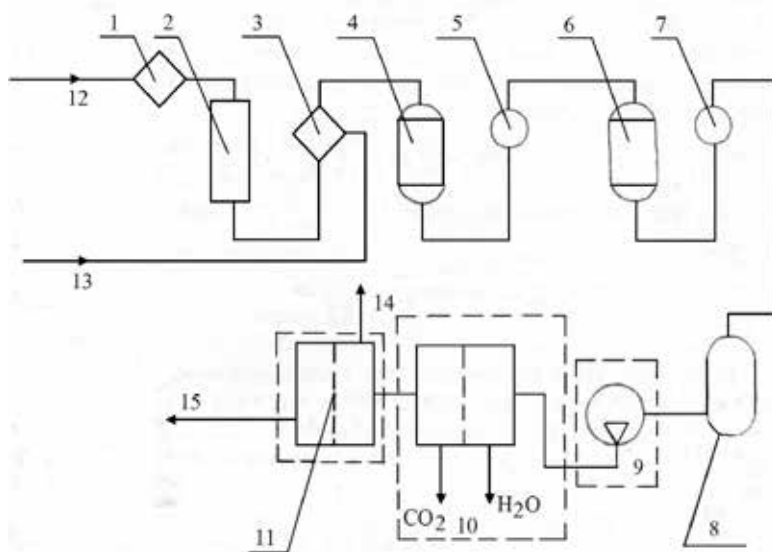


Рис. 18.209. Схема установки для конверсионного мембранного метода получения высокочистого водорода из природного газа:

- 1 – электрический нагреватель; 2 – реактор очистки от серы; 3 – смеситель водяного пара; 4 – высокотемпературный реактор; 5 – теплообменник;
- 6 – конвертор диоксида углерода (с медно-хромовым катализатором);
- 7 – металлообменник; 8 – ресивер; 9 – компрессор; 10 – очиститель CO_2 и H_2O ;
- 11 – диффузионная камера получения особо чистого водорода; 12 – природный газ; 13 – водяной пар; 14 – отходящий газ; 15 – особо чистый водород

Технические характеристики установки производительностью 250 м³ Н₂/ч

Чистота получаемого водорода, об. %	– не менее 99,9999
Производительность по СО ₂ , кг/ч	– 117
Рабочее давление смеси, МПа	– 0,12-2,0
Давление особо чистого водорода на выходе, МПа	– 0,5-15
Удельный расход электроэнергии с учетом компрессии, кВт·ч/м ³ Н ₂	– 2,5-3,0

Существенные преимущества предлагаемых установок заключаются, прежде всего, в высокой производительности и качестве получаемого водорода. Кроме того, установки характеризуются низкими капитальными и эксплуатационными затратами, компактностью, простотой включения в существующие схемы производства. Важные преимущества диффузионного метода получения водорода – сравнительно низкая энергоемкость, надежность и простота обслуживания, а также относительно малая себестоимость водорода.

Закономерности проникновения водорода через металлические мембраны

Как отмечалось, большое внимание уделяется проблеме получения особо чистого водорода, являющегося одним из перспективных энергоносителей. При этом наиболее простым и экономичным является метод селективной диффузии водородосодержащего газа через сплавы металлов на основе палладия. В работе Е.С. Левина, Ю.Н. Гука и авторов рассмотрен вопрос влияния скорости проникновения водорода на прочностные свойства таких материалов [18.318; 18.320].

Проникновение водорода через твердые металлы и сплавы является сложным процессом, включающим адсорбцию, абсорбцию и диффузию атомов водорода в кристаллической решетке. Стационарный процесс проникновения водорода при неизменном градиенте его концентраций на входной и выходной сторонах материала определяется потоком газа, т. е. количеством водорода, проходящим через образец толщиной δ и площадью S за одну секунду постоянной температуре T и перепаде P_1 и P_2 . Скорость V проникновения водорода – это поток

через единичную площадку. Классические исследования проникновения водорода через платину были проведены О.В. Ричардсоном с коллегами. При этом предполагалось, что поверхностные реакции протекают с большой скоростью и практически не лимитируют скорость суммарного процесса (растворимость водорода в платине очень маленькая).

При некотором преобразовании уравнение О.В. Ричардсона можно получить в виде

$$V = DL(P_1^{1/2} - P_2^{1/2}) \frac{S}{\delta} = DL(\sqrt{P\alpha} - \sqrt{P_2}) \frac{S}{\delta}. \quad (18.442)$$

Здесь произведение $DL = P'$ – коэффициент водородопроницаемости; P – общее давление водородосодержащего газа на входе; α – объемная доля водорода в сырьевом газе; δ и S – толщина и площадь поверхности образца соответственно; D – коэффициент диффузии; L – растворимость.

При этом уравнение Вант-Гоффа для коэффициента L растворимости имеет вид

$$L = L_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right), \quad (18.443)$$

где ΔH – теплота растворения молекулярного водорода.

Уравнение Аррениуса для коэффициента D диффузии

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right), \quad (18.444)$$

где E_D – энергия активации процесса диффузии.

Таким образом, скорость потока водорода через образец (по существу это производительность, см³/ч разделительного элемента) определяется главным образом, коэффициентом водородопроницаемости материала экспоненциально зависящего от абсолютной его температуры, перепада давлений и отношения S/δ . Учитывая, что $\sqrt{P\alpha} > \sqrt{P_2}$, получили при $T = \text{const}$

$$V = DL\sqrt{\alpha}\sqrt{P} \frac{S}{\delta}. \quad (18.445)$$

При конструировании аппаратов для получения особо чистого водорода обычно используются плоские или трубчатые разде-

лительные элементы-фильтры. Для последних, исходя из условий прочности труб, в работе [18.321] были получены, казалось бы, парадоксальные результаты. Действительно, используя соотношение

$$\frac{d}{\delta} = \frac{2[\sigma]}{P}, \quad (18.446)$$

где d и δ – наружный диаметр и толщина стенки тонкой трубки; $[\sigma]$ – допустимое напряжение; P – давление на трубку, определяющее прочность материала, и выражая площадь поверхности S через n трубок и их длину l ($S = \pi dnl$), имеем

$$\frac{S}{\delta} = \frac{\pi nl 2[\sigma]}{P}. \quad (18.447)$$

Подставив полученное выражение в формулу (18.445), нашли

$$V = DL\sqrt{\alpha}\sqrt{P}\frac{\pi nl 2[\sigma]}{P} = \frac{C}{\sqrt{P}}, \quad (18.448)$$

где $C = DL\sqrt{\alpha}\pi nl 2[\sigma] = \text{const}$ при $T = \text{const}$.

Таким образом, авторы [18.321] пришли к выводу, что уменьшение давления водородосодержащего газа на разделительный элемент, приводящее к увеличению запаса прочности стенки трубки при постоянном ее диаметре, способствует росту выхода особо чистого водорода. т. е. к увеличению производительности фильтра.

Уравнение (18.446) характеризует критические механические свойства тонкой трубки. Если давление газа P превышает критическое значение, то трубка деформируется и ломается, что приводит к прекращению эксплуатации фильтра. Из формулы (18.445) следует, что скорость потока водорода V через металлическую мембрану пропорциональна корню квадратному из давления P . В этом случае формула (18.446) помогает решить вопрос лишь о критическом значении давления, при котором возможно нарушение прочности мембраны и соответствующем критическом значении скорости потока водорода $V_{\text{кр}}$.

Таким образом, уравнение (18.448), выраженное в виде

$$V_{\text{кр}} = DL\sqrt{\alpha}\sqrt{P}\frac{\pi nl 2[\sigma]}{P} = C_1 \frac{nl 2[\sigma]}{\sqrt{P}}, \quad (18.449)$$

показывает, что существует некоторая критическая скорость потока водорода, при которой сохраняются прочностные свойства трубки. Чем больше давление P , тем при меньшей критической скорости $V_{кр}$ возможно разрушение трубки.

В случае работы диффузионного аппарата в рамках допустимых по прочности материала давлениях уравнение О.В. Ричардсона полностью сохраняет свои параметрические свойства, а производительность аппарата увеличивается с ростом давления газа.

В заключение отмечено, что наиболее эффективным направлением исследований получения особо чистого водорода методом селективной диффузии является разработка новых высокотемпературных сплавов на основе палладия, характеризующихся более высокой водородопроницаемостью, большей термостойкостью в атмосфере водорода, достаточной пластичностью и высокой жаростойкостью [18.320].

Сплавы для получения особо чистого водорода

В работе [18.320] были исследованы температурные зависимости проницаемости, диффузии и растворимости водорода в поликомпонентных сплавах на основе палладия – PdPtWRh и PdPtMoEr. Измерения проводили методом установления стационарного потока газа при ступенчатых нагреве и охлаждении образцов в интервале температур от 573 до 1173 К. Погрешности определения проницаемости, коэффициента диффузии и растворимости водорода в изученных сплавах не превышали $\pm 4\%$, $\pm 6\%$ и $\pm 12\%$ соответственно.

Исследуемые материалы готовили в герметической индукционной печи в атмосфере аргона из чистых металлов, содержащих не более 0,002 МПа (0,02 ат.) % примесей. После плавки и светлого отжига при температуре 1173 К в течение часа слитки подвергали горячей ковке и последующей прокатке до толщины $\sim 2,0$ мм. Из них вырезали образцы в форме дисков диаметром 24,5 мм.

Полученные результаты показали, что в изученном интервале температур проницаемость, коэффициент диффузии и растворимость водорода в сплавах PdPtWRh и PdPtMoEr описываются экспоненциальными зависимостями. При этом было установлено, что скорости роста проницаемости и диффузии водорода в исследованных сплавах с увеличением температуры заметно выше, а растворимость водорода ниже, чем в чистом палладии.

Из приведенных в табл. 18.37 результатов видно, что при высоких температурах ($T > 1070$ К) водородопроницаемость изученных сплавов больше, чем у применяемого в настоящее время сплава В-1, основу которого составляет твердый раствор палладия с серебром и максимальная температура эксплуатации которого 873 К. Поскольку современные технологии получения особо чистого водорода основаны на его выделении из углеводородного сырья (природный и коксовый газы, отходы печей металлургического производства и т. д.), то это неизбежно требует применения высокотемпературных материалов для предотвращения процесса сажеобразования на диффузионных фильтрах.

Результаты механических испытания сплавов осуществляли на установке «Instron» при температурах 973, 1073 и 1123 К. Водородостойкость исследовали при термоциклировании (150 циклов) образцов в атмосфере водорода в интервале температур 300–773 К. Сопоставление представленных в таблице результатов с характеристиками сплава – прототипа PdPt, разработанного в ФРГ (механическими свойствами сплава В-1 при данных температурах не располагали), показывает, что кроме высокой водородопроницаемости, изученные сплавы обладают большой термостойкостью в атмосфере водорода, достаточной пластичностью и высокой жаростойкостью.

Таблица 18.37

Таблица физико-механических свойств сплавов на основе палладия

Физико-механические свойства	T , К	PdPtWRh	PdPtMoEr	В-1	$Pd_{0,70}Pt_{0,25}$
Водопроницаемость	873	$9,26 \cdot 10^{-3}$	$9,18 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-2}$	
$\left(\frac{\text{см}^3 \text{H}_2 \cdot \text{мм}}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{атм}^{1/2}} \right)$	1073	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$	—	$2,5 \cdot 10^{-3}$
	1123	$1,88 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	—	$3,4 \cdot 10^{-3}$
Предел прочности	1073	10,7	10,7	—	6,4
на растяжение, кг/мм ²	1123	10,3	10,3	—	4,8
Предел текучести, кг/мм ²	1073	7,8	7,8	—	5,1
	1123	7,5	7,5	—	4,2
Жаростойкость за 100 ч	1573	0,045	0,045	—	0,035
Относительное	1073	25	25	—	26
Удлинение, %	1123	26	26	—	28

Таким образом, проведенные исследования показали, что рассмотренные материалы по своим служебным свойствам превосходят известные в мировой практике сплавы аналогичного назначения и могут быть рекомендованы в качестве высокотемпературных диффузионных фильтров для получения особо чистого водорода из водородосодержащих газовых смесей.

18.9.8. Развитие энергометаллургического комплекса и АСУ ТП комплекса

Данные разработки являются частью аспирантской работы С.Г. Супрунова, проводимой под руководством В. Г. Лисиенко. При этом реализуется развитие технологии и структуры комплекса и конкретизируется ряд деталей АСУ ТП [18.324].

Выбор технологии газификации твердого топлива с предварительным полукоксованием

В технологической схеме энергометаллургического комплекса [18.2; 18.325] предусматривается получение газифицированного топлива с последующим двойным использованием для получения электроэнергии в газотурбинных, парогазотурбинных установках и для протекания восстановительных процессов в печах при получении металлургического сырья.

При этом актуальной задачей является обоснование и выбор процесса и оборудования важнейшего структурного элемента комплекса - газификатора для получения генераторного газа (сингаза). В нашей стране и в мировой практике (особенно в США) в последнее время ведутся исследования по обоснованию (уже в современных условиях) выбора наиболее эффективной схемы и оборудования для газификации топлив. Например, в США ставят задачи получения сингаза с использованием кислорода для газификации различных видов топлив, включая биотопливо и даже древесное топливо. При этом планируется не только применение этого газа как топлива, в частности, для получения электроэнергии, но и для получения в конечном итоге жидкого топлива и водорода.

В нашей стране, например, определенное внимание, в том числе и в работах под руководством авторов, отдается газификации топлив

ва в жидкой ванне с использованием кислорода [18.2; 18.3; 18.326; 18.328]. Тем не менее, представляет интерес рассмотреть и сопоставить различные способы газификации твердых топлив, в том числе и при воздушном дутье.

Возможно, среди различных способов получения сингаза отдельное место может занять комбинированный процесс полукоксование с последующей газификацией полукокса.

В отличие от высокотемпературного процесса – газификации, главной целью при осуществлении низкотемпературных процессов термической переработки углей, таких как полукоксование, является приготовление твердого остатка полукокса с получением дополнительного набора продуктов. Этими продуктами являются: обогащенный метаном газ полукоксования, имеющий более высокую температуру сгорания, имеющая высокое содержание алифатических углеводородов смола и подсмольная вода. Переработка этих продуктов позволяет увеличить степень использования химического потенциала угля. Другим явным достоинством низкотемпературных процессов термической переработки углей является то, что сырьем для низкотемпературной термической переработки могут быть самые разнообразные виды топлив: каменные и бурые угли, торф, а также сланцы. Однако при этом в отличие от процессов газификации при уменьшении возраста используемого топлива резко ухудшаются свойства продуктов газификации.

В зависимости от условий проведения процесса, от природы исходного топлива выход продуктов изменяется. Из более древних каменных углей получается больше полукокса, соответственно меньше смолы и газа. Соотношение смолы и газа зависит от условий эвакуации из зоны термической переработки образующейся парогазовой смеси. Состав смол и газа также сильно зависит от исходного сырья, особенно ощутимо при высоком содержании диоксида углерода в газах, полученных из торфа и бурого угля. Данная особенность позволяет использовать данную установку в широком спектре производств. В случае применения восстановительного газа в металлургии необходимо максимально увеличивать выход полукокса для создания максимального количества сингаза, который в свою очередь может быть использован либо, как отмечалось, в безкоксовых металлургических процессах, либо как защитная атмосфера. Для нужд энергетики необходимо максимально увеличивать выход

высококалорийного газа для ГТУ или для сжигания в котле-утилизаторе. В будущем (при сокращении количества и удорожании добываемой нефти), используя процессы гидроочистки, дистилляции крекинга и других процессов из смолы, подсмольной воды можно синтезировать газ, моторные топлива (бензин, дизельное топливо), мазут, парафин, смазочные масла, пек.

При рассмотрении продуктов процесса полукоксования можно выделить основные качества продуктов. Полукокк имеет большое количество летучих соединений и обычно применяется как сырье газификации для получения технологических и горючих газов. Частично полукокк может быть использован при производстве адсорбентов, применяемых для очистки газа полукоксования, сингаза или продан напрямую потребителю как бездымное топливо [18.329]. В полукоксе очень мало серы и влаги по сравнению с бурым углем, так как основная часть испаряется с газом полукоксования, поэтому его можно использовать для замены угля в печах и котельных без дополнительной осушки, с меньшим ущербом для окружающей среды и предотвратить разрушение технологического оборудования продуктами горения серы.

Газ полукоксования после очистки от газового бензина, сероводорода и диоксида углерода представляет высококалорийное газообразное топливо, обогащенное метаном, имеющее теплоту сгорания: для бурых углей до 19 МДж/м^3 , для каменных углей до 24 МДж/м^3 , 34 МДж/м^3 . Теплота сгорания очищенного газа полукоксования в 3–4 раза больше теплоты сгорания газа при паровоздушном способе газификации (теплота сгорания $6\text{--}7 \text{ МДж/м}^3$ и сравнима по теплоте сгорания с парокислородной газификацией под давлением (теплота сгорания $12\text{--}18 \text{ МДж/м}^3$) [18.329]. Данные цифры справедливы только для установок полукоксования с внешним обогревом, так как в установках с внутренним обогревом газ смешивается с дымовыми газами, и теплота сгорания резко падает из-за большого количества двуоксида углерода.

Очищенный высококалорийный газ не будет требовать более высокой степени сжатия компрессором газовой турбины парогазовой установки, при этом увеличивается КПД, и соответственно увеличивается количество вырабатываемой электроэнергии. Сократится количество отходящих газов для производства пара в ПТУ, это по-

зволит в свою очередь уменьшить мощность дутьевого вентилятора, дымососа котла утилизатора – одних из наиболее энергозатратных установок ПТУ. Уменьшение объема потребляемого газа позволит уменьшить нагрузку на систему очистки и осушки газа, приведет к сокращению отбираемого из турбины пара, и, соответственно, увеличит количество вырабатываемой электроэнергии.

Наличие высококалорийного газа полукоксования даст возможность уменьшить выработку сингаза в газификаторе, позволяя сократить расход электроэнергии, кислорода и пара для парокислородной газификации, уменьшить потребную производительность газификатора и установки разделения воздуха.

Третий продукт – смола, на первый взгляд, может показаться отходом производства полукоксования, однако, это не совсем так, по количеству и свойствам получаемых продуктов смола сопоставима с нефтью, однако, в настоящее время пока экономически не выгодно перерабатывать смолу. Известно, что добыча нефти с каждым годом становится всё трудозатратнее, разрабатываются всё более удалённые месторождения, создаются новые методы добычи, что увеличивает её цену, поэтому проводятся реконструкции старых мощностей переработки нефти, внедряются процессы глубокой переработки мазутов, с использованием новейших катализаторов, используются сжиженный природный и нефтяной газ в качестве бензина, увеличивается доля дизельного транспорта. Все вышеперечисленные факторы позволяют увеличить объем и качество продукции, без увеличения количества используемой нефти. Как дополнительное средство уменьшения количества потребляемой нефти вполне может стать переработка смол процесса полукоксования. После процесса дистилляции, смола разделяется на три фракции: легкую, среднюю и остаток. Состав каждой фракции и продукты, получаемые в результате переработки, во многом зависят от сырья полукоксования и выбранного метода переработки, в результате из смолы можно получить газ, моторные топлива (бензин, дизельное топливо), мазут, парафин, смазочные масла и пек.

Все продукты имеют широкий спектр применений, в частности, пек – остаток фракционирования смолы, он служит основным связующим и пропиточным материалом при производстве углеграфитовых материалов любой типа и назначения. Пек – сырьё для из-

готовления беззольного пекового кокса – исходного продукта при изготовлении анодных и электродных масс, используемых при производстве алюминия [18.330].

В мировых запасах ископаемого топлива на долю углей, горючих сланцев и торфа приходится 93 %, на долю нефти и газа 7 %. В Азии сосредоточено 57 % запасов. Общие геологические запасы составляют 6800 млрд. т, из которых 4700 – каменные угли, а 2100 - бурые [19.329]. Добыча угля составляет примерно 700 млн. т/год и постепенно снижается. Уголь применяется в основном как топливо для котельных в энергетике, а также применяется как бытовое топливо. Такое узкое применение угля объясняется просто – получение из угля других продуктов экономически невыгодно из-за высокой себестоимости, намного превышающей себестоимость продуктов из нефти.

Кардинально изменить сложившуюся вокруг применения угля ситуацию позволит создание энергоустановок одновременно сочетающих в себе использование угля как сырья и как энергоносителя, позволяя более глубоко использовать потенциал угля. В качестве примера как раз и может выступить энергометаллургический цикл.

Весь высокоэнергетический газ полукоксования в случае энергометаллургического комплекса будет использоваться в ПГУ, сингаз будет использоваться в металлургическом цикле, а остатки будут смешиваться с высокоэнергетическим газом и сжигаться. Смола же может быть применена в нескольких направлениях: получаемый газ может подмешиваться к газу полукоксования, бензин может использоваться для собственного транспорта предприятия, полученные смазочные масла могут использоваться непосредственно для технологического оборудования, мазут может накапливаться как резервное топливо.

Можно полагать, что по сравнению с используемыми в настоящее время установками, с точки зрения эффективности переработки угля, одной из наиболее перспективных для промышленного внедрения в настоящее время является комбинированная технология полукоксования и газификации.

В данной работе приведены основные преимущества данной технологии, в том числе при использовании в энергометаллургическом комплексе: уменьшение размеров газификатора и установки по разделению воздуха, что позволит уменьшить количество опас-

ных участков на производстве и повысить общие показатели надёжности всего производства в целом. Увеличивается КПД ПГУ за счет снижения потерь в компрессоре и уменьшается объем удаляемых из котла-утилизатора газов. Обеспечивается также возможность создания более технологически сложных продуктов при использовании продуктов переработки смолы и возможность перераспределения получаемых продуктов, что позволит оперативно реагировать на потребности рынка. При этом в качестве сырья для низкотемпературной термической переработки могут быть использованы самые разнообразные виды топлив: каменные и бурые угли, торф, а также сланцы.

Возможности применения системы кодирования KRAFTWERK KENNZEICHEN SYSTEM (KKS)

Правильный выбор способа построения структуры проектов большого объема имеет значение и должен происходить в самую первую очередь на этапе проектирования. РАО «ЕЭС России» обязало использовать систему KKS на вновь вводимых энергетических блоках с АСУ ТП, а также на конструируемых энергетических блоках, на которых предусматривается создание АСУ ТП [18.332]. Рассмотрены основные преимущества и возможности внедрения данной системы [18.331].

К проектам большого объема относятся проекты предприятий с парогазовыми установками и установки, разработанные в «способе выплавки стали и сплавов в замкнутом энергометаллургическом цикле» [18.2; 18.324]. Для реализации такого проекта накоплен обширный опыт по внедрению новейших технологий (таких как IGCC) реализованы проекты по модернизации уже существующих мощностей, разработаны и опробованы новые газовые турбины, газификаторы. Также уже более 25 лет используется разработанная немецким объединением промышленников (VGB) система кодирования для электростанций – Kraftwerk Kennzeichen System, сокращенное название – KKS. РАО «ЕЭС России» еще в 2001 г. приобрело у VGB документацию, необходимую для применения системы KKS в энергетике [18.332].

KKS по сути является перечнем кодов, обозначающая все объекты: технологические системы, агрегаты, средства управления и сбора информации, алгоблоки прикладных программ управления и используемые в них сигналы, арматуру, кабели, помещения и др.,

- всё что встречается в практике проектирования, монтажа, наладки и эксплуатации оборудования. Всего в системе используется более 12000 системных кодов, с одной стороны действительно внушающее число, однако, этого недостаточно для проектирования электростанций, на этот случай предусмотрен резерв позволяющий увеличивать в десятки раз количество идентификаторов. В число резерва можно отнести основную группу Z, специально выделенную для дополнительного оборудования, в случае с энергометаллургической установкой эта группа может идентифицировать металлургическую часть.

Основное назначение систем классификации – это дать каждому объекту уникальный идентификатор, но в каждом отдельном случае структура подобных систем зависит от цели использования. Классической системой идентификаторов является мнемоническая, наиболее распространенная и максимально приближенная к человеку. Основным недостатком такой системы является то, что это сложившиеся традиционно названия, часто отличные на разных предприятиях, часто дублирующиеся, что делает ее крайне неудобной для обработки. В качестве примера организации мнемонической системы кодирования, широко используемой и имеющей структуру, данные приведены ГОСТе 2.710-81 [18.333]. Данная структура является основной для проектирования практически всех электрических схем и, как отмечалось, может быть использована при создании энергометаллургического комплекса.

Возможности применения устройств, поддерживающих HART-протокол

Данные предложения в применении к построению АСУ ТП энерго-металлургического комплекса внесены С.Г. Супруновым.

Правильный выбор способа передачи данных от средств измерения имеет огромное значение и обязан проводиться в самую первую очередь на этапе проектирования. Все больше и больше измерительных приборов поддерживают в этом плане Industrial Ethernet, Profinet, Modbus RTU и др., расширяя тем самым границы использования с верхнего уровня до полевого уровня, замещая тем самым классические схемы передачи.

Средства измерения являются основой построения любой системы управления. Системы управления без достаточной, достоверной

и своевременно полученной информации могут не справляться с возложенными на них задачами. В случае со сложными технологическими процессами, такими как металлургия и энергетика, сбои в работе могут вызвать не только недовыпуск продукции, но и выход из строя дорогостоящего оборудования и в худшем случае вызвать пожар, выбросы химических опасных веществ и гибель людей. Разработанный способ выплавки стали и сплавов в замкнутом энергометаллургическом цикле предполагает органическое сочетание энергетики и металлургии и поэтому крайне важно сделать выбор в пользу надежного и быстродействующего оборудования [18.325].

Рассматривая историю развития как цифровой, так и аналоговой техники, необходимо подчеркнуть то обстоятельство, что развитие обоих этих технологий происходило с самого начала практически синхронно до появления микропроцессоров, реализованных в виде одной микросхемы. Расцветом аналоговых технологий называют 1960-е годы, аналоговые компьютеры имели невероятный успех, и являлись повседневным инструментом ученых для решения множества специфических задач в различных областях науки.

В настоящее время цифровая техника вытесняет аналоговые решения и технологии, это можно заметить даже в быту, например, цифровое телевидение, потребители всё больше предпочитают именно его, так как получают большой выбор программ, высокое качество изображения и с Wi-Fi технологией подключение не требует даже проводов. Буквально двадцать лет назад такое было фантастикой, но закон Мура выполняется и каждые два года вычислительная мощность процессоров удваивается, технологии производства улучшаются.

На самом деле, отказ от аналоговых решений в пользу только цифровых не является оптимальным, расчленение вычислительного процесса в ходе решения задачи на отдельные операции, выполняемые АВМ и ЦВМ в комплексе, уменьшает объем вычислительных операций, возлагаемых на ЦВМ, что при прочих равных условиях существенно повышает общее быстродействие системы. Такие системы получили название гибридных вычислительных систем. Появление гибридных вычислительных систем было сопряжено с тем, что для ряда возникающих в технике задач моделирования сложных систем ни аналогового, ни цифрового методов не хватило. Напри-

мер, когда цифровые машины не имели достаточного быстродействия для обработки возникающих массивов данных в реальном времени, а аналоговые машины не позволяли достичь всего возможного разнообразия моделируемых ситуаций. Эффективный гибридный комплекс может быть создан только в результате тщательного исследования предметной области, уточнения всех особенностей применения и детального анализа типичных задач. Поэтому представить какую-то единую архитектуру гибридных вычислительных систем очень сложно. Однако, в середине 80-х годов компанией ROSEMOUNT был впервые предложен цифровой инструмент HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol), представляющий собой цифровой сигнал, наложенный на аналоговую токовую петлю 4–20 мА. данный инструмент может лечь в основу создания любой гибридной вычислительной системы. В настоящее время HART технология является стандартом для полевого уровня, что в свою очередь позволяет подобрать любые требующиеся средства измерения для создания новых или при модернизации старых систем АСУ. В случае с модернизацией большим преимуществом является то, что в случае замены одного прибора, уже работающего по классической токовой петле, замена не требует дополнительного монтажа. Передача дополнительных данных позволяет сократить количество средств измерения и реализовать диагностические функции.

В металлургии и энергетике процесс внедрения цифровых технологий происходит неравномерно. Верхний уровень АСУ, а именно реализация систем передачи, сбора, регистрации, визуализации и архивирования информации построен на цифровых технологиях, ярким примером сочетающих в себе указанный функционал, является большой набор SCADA систем. На полевого уровне ситуация диаметрально противоположная – подавляющее количество используемых средств измерения являются аналоговыми, причём замена в некоторых случаях приводит к ухудшению надёжности и быстродействия. Одним из таких примеров является замена защит высоковольтных выключателей на микропроцессорные (например, REF543 производство ABB). Основная причина перехода – это большая трудоёмкость создания аналоговой защиты, однако, практически все специалисты признают, что это решение шаг назад по большей части в надёжности и в быстродействии систем защит

среднего напряжения. В рамках АСУ ТП довольно остро стоит вопрос о возможности использования ПИД-регуляторов, в некоторых случаях возникают проблемы со скоростью обработки и выдачи сигнала задания, но с использованием HART протокола становится возможным разделение подачи токовых петель непосредственно на объект управления в случае наличия встроенного ПИД-регулятора (частотный привод) и изменять параметры через систему управления (контроллер). С помощью данного приёма возможно увеличивать надёжность системы, так как в случае выхода одного из компонентов возможен выбор рабочего задания и управления, увеличена скорость реакции на внешние воздействия и возможна корректировка с помощью системы управления основных характеристик.

18.9.9. Использование плазменных, акустических и индукционных эффектов при управлении в новых технологиях обработки материалов

Данные материалы являются итоговыми по разработке новых устройств в процессах управления обработки материалов. Ряд конкретных материалов по данным разработкам приведен в предыдущих изданиях [18.2–18.4].

Развитие новых современных технологий и нанотехнологий является приоритетным направлением для нашей страны. В этом плане особого внимания заслуживают современные методы обработки материалов с использованием плазменных, акустических и индукционных технологий с соответствующими, управляющими воздействиями.

Данная работа* выполнялась большим коллективом участников (УрФУ, Национальный исследовательский технологический университет-МИСиС, Региональное уральское отделение АИН им. А.М. Прохорова, Научно-исследовательский космический центр

* Работа выполнена в рамках темы № 7.3215.2011 «Разработка теоретических основ и математическое моделирование автоматизированных технологий и агрегатов по производству новых эффективных nano- и конструкционных материалов с применением плазменных, акустических и индукционных методов обработки» в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации на оказание услуг (выполнения работ).

им. М.В. Келдыша, фирма РЕЛТЭК, Уралгипромет и др.). При этом ряд участников являются членами АИН им. А.М. Прохорова и одновременно выполняют актуальные инженерные задачи (в содружестве с другими организациями) по реализации данных разработок.

В работе проводится разработка и исследование следующих технологий, агрегатов и устройств: 1) получение нанокристаллических порошков с использованием плазменно-акустической установки; 2) процессы пылеосаждения и обработки стали и высоколегированных сплавов, а также других материалов с использованием звуковых акустических колебаний; 3) получение высоколегированных сплавов и безуглеродистого железа при индукционном вращательном эффекте металло-шлаковой ванны. Эти технологии объединяет важная задача существенного улучшения качества получаемых материалов с достижением в ряде случаев наноэффектов.

Учитывая достаточно масштабный характер данной работы, приведем лишь некоторые примеры конкретного решения данных проблем [18.335; 18.336].

Разрабатываемые теоретические положения и конструкция установки плазменно-акустического метода получения нанопорошков детально представлены в работах [18.4; 18.336; 18.339].

Материалы, связанные с воздействием звуковых акустических колебаний на процессы пылеосаждения и на расплавленную ванну освещены в работах [18.4; 18.336; 18.338], а также представлены в целом ряде патентов на изобретение и полезные модели.

Приведем также пример универсальной акустической фурмы для продувки металла в ковшах, (см. рис. 18.210), в которой сопло и резонатор акустического излучателя (позиции 3 и 4) встроены непосредственно в корпус фурмы.

Ранее при использовании подобных пылеосаждающих фурм на сталеплавильных печах (а также было предложение их использовать на отражательных медеплавильных печах) акустический излучатель располагался на значительном расстоянии от фурмы. Это приводило к затуханию акустических колебаний на пути к выходному соплу фурмы и резко снижало эффективность пылеосаждения. Приближение акустического излучателя к выходному соплу фурмы значительно увеличивает эффективность пылеосаждения.

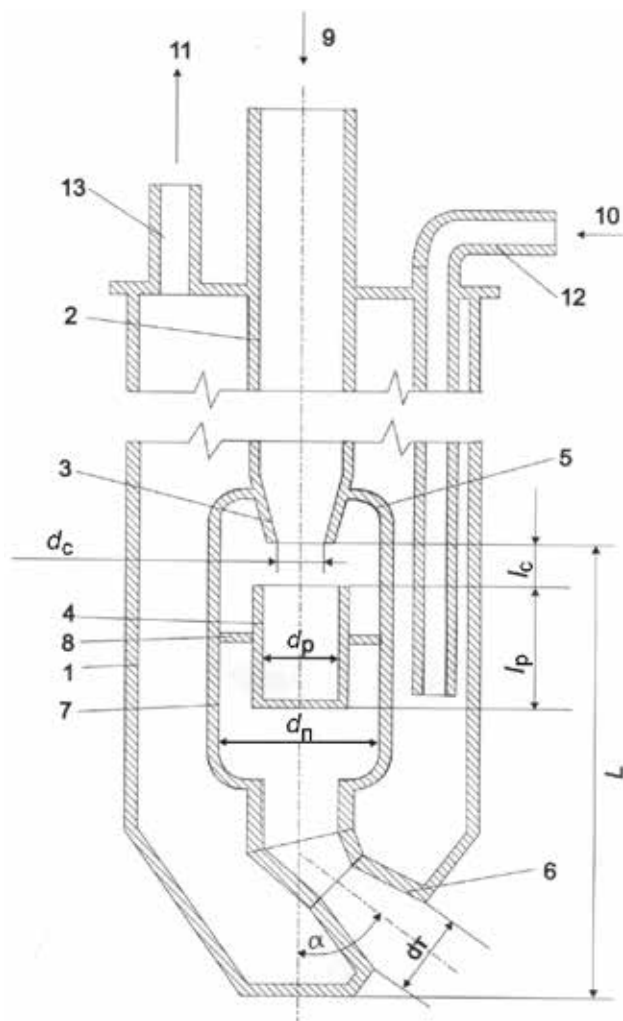


Рис. 18.210. Фурма для подачи акустически возбужденных газовых струй в рабочее пространство энерготехнологических агрегатов;

1 – цилиндрический кожух; 2 – трубопровод сопла акустического излучателя; 3 – сопло излучателя; 4 – резонатор; 5 – держатель внешнего опорного цилиндра; 6 – сопло выхода газа; 7 – внешний опорный цилиндр; 8 – направляющее и центрирующее кольцо; 9 – подача газа; 10, 11 – подвод и отвод охлаждающей воды; 12, 13 – соответствующие патрубки; d_s , d_n , d_p , d_c – диаметры: выходного сечения сопла Лавали; опорного цилиндра; резонатора, сопла, излучателя; l_p и l_c – длина резонатора и расстояние между сечениями сопла и резонатора; α – угол между вертикалью и направлением оси сопла Лавали ($\alpha = 0\text{--}30^\circ$)

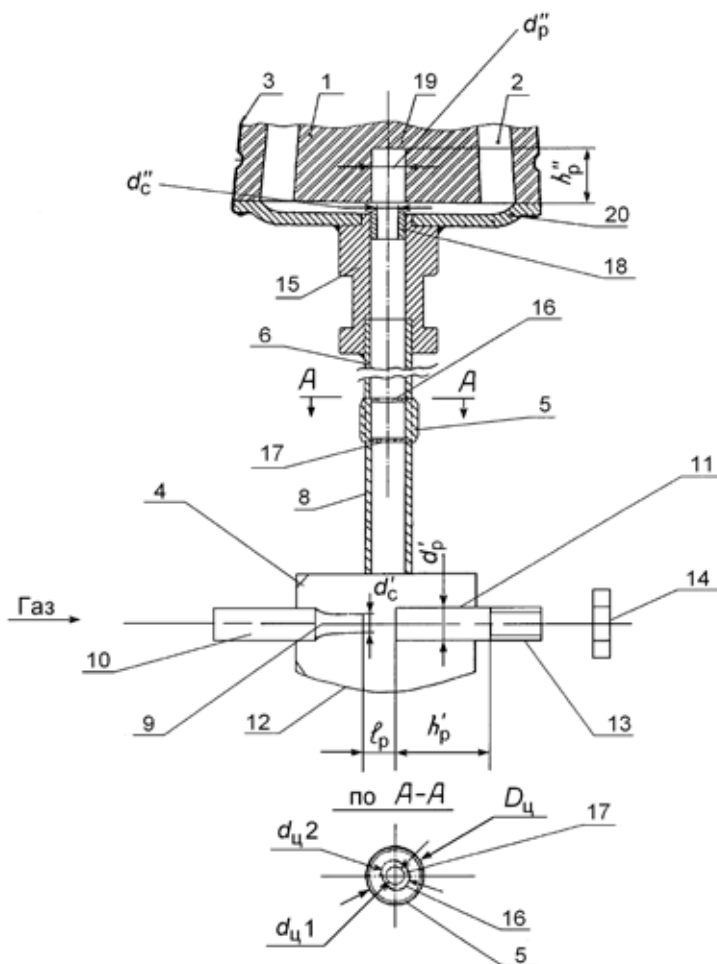


Рис. 18.211. Управляемая акустическая фурма для продувки металла в ковше:

- 1 – продувочная пробка; 2 – щелевые отверстия; 3 – металлический кожух;
- 4 – промежуточный цилиндрический акустический излучатель; 5 – внутренний струйный акустический излучатель; 6 – стационарная подводящая труба;
- 7 – верхняя крышка внешнего акустического излучателя; 8 – съемная газоподводящая труба; 9 – сопло; 10 – газоподводящая трубка; 11 – резонатор; 12 – отражатель; 13 – подвижное днище резонатора; 14 – поворотный шток; 15 – втулка-съемник;
- 16 – внешнее и 17 – внутреннее отверстия в торцах акустического цилиндра (по ходу движения продувочного газа); 18 – вставка с соплом для подачи газа; 19 – резонатор в теле продувочной пробки; 20 – отражатель; d_c' , d_c'' – диаметры выходных сопел излучателя; l_p – расстояние между соплом и входом в резонатор; h_c' , h_c'' – длина резонаторов

Разработанная управляемая акустическая фурма для продувки расплавленного металла в сталеразливочных ковшах (см. рис. 18.211). Фурма для усиления эффекта воздействия акустических колебаний на металл (с целью интенсификации очистки металла от вредных примесей) имеет три последовательно включенные ступени генерации акустических колебаний (см. рис. 18.211, позиции 10, 13; 5 и 18, 19). При этом нижний 10, 13 и верхний 18, 19 излучатели выполнены в виде системы «сопло – резонатор», а средний излучатель 5 имеет оригинальную конструкцию в виде цилиндра с встроенными нижней и верхней диафрагм.

Для интенсификации удаления пузырьков газов из расплавленной стекломассы разработан струйно-акустический волновод [18.335; 18.336] (см. рис. 18.212).

Разработка многофункционального плавильного агрегата (МПА) с вращательным эффектом металла и шлака, как ранее отмечалось, проводилась с активным, инициативным участием Е.А. Коршунова большим коллективом [18.2–18.4; 18.340; 18.341]. При этом также отметим интеллектуальную защиту данной работы большим количеством патентов на изобретения.

Разработан как ряд модификаций МПА, так и целая гамма технологических процессов. Весьма перспективными вариантами технологий, нацеленными на получение безуглеродистого железа, и в результате дальнейшей обработки металла с нанокристаллической структурой и повышенными эксплуатационными свойствами, являются технологии по переработке в МПА конвертерного ванадиевого шлака, небалансовых бокситов и железной окалины. В результате исследований получены материальные и тепловые балансы плавов, определены расходы электроэнергии как на нагрев и плавление металла, так и на вращение металла и шлака, проведен также энергетический анализ.

Разработаны конструктивные элементы нагревательных и вращательных индукторов МПА, один из перспективных вариантов которых приведен на рис. 18.213.

Проведенные работы, как отмечалось, объединяют усилия по использованию современных, методов обработки материалов для повышения качества продукции, снижения энергозатрат и эмиссии вредных и парниковых выбросов.

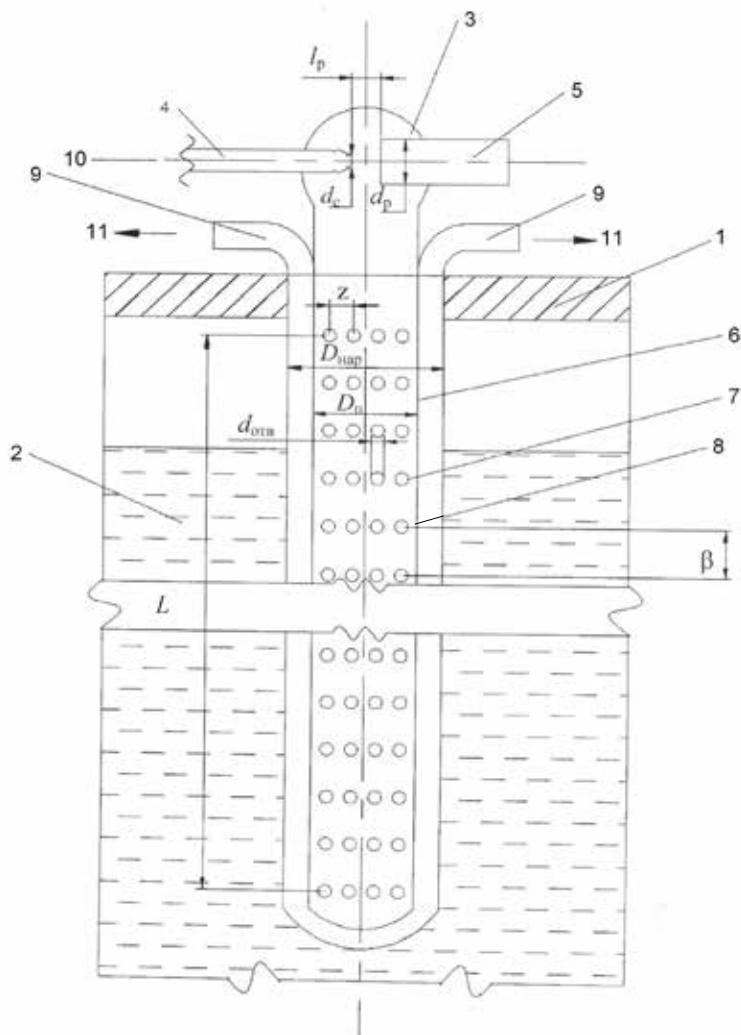


Рис. 18.212. Схема погружного волновода акустических колебаний:
 1 — ограждение; 2 — расплав; 3 — акустический излучатель; 4 — сопло; 5 — резонатор излучателя; 6 — внутренний цилиндр; 7 — отверстия во внутреннем цилиндре для истечения струй акустически возбужденного газа; 8 — внешний погружной цилиндр; 9 — трубопроводы отвода газа; 10 — подача газа (компрессорного воздуха и др.); 11 — отвод газа; d_c , d_p — диаметры выходных сечений сопла и резонатора; l_p — расстояние между выходным сечением сопла и входа в резонатор; $D_{нар}$ и $D_{вн}$ — диаметры наружного и внутреннего цилиндра; $d_{отв}$ — диаметр отверстий; Z и β — расстояния между осями отверстий в теле цилиндра; L — длина цилиндрической части, занятой отверстиями

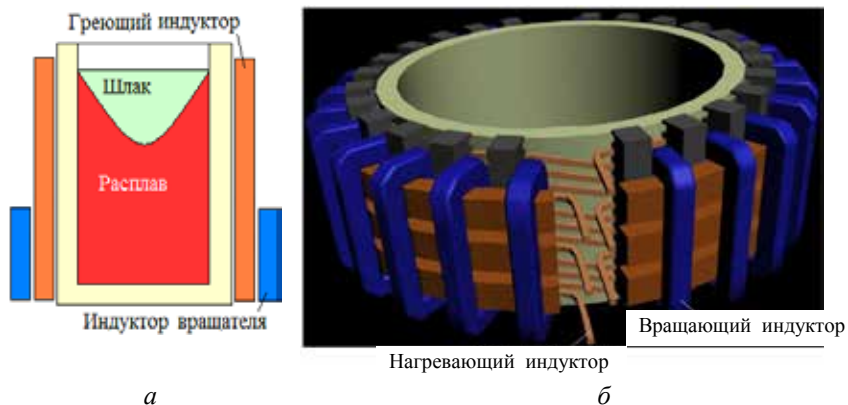


Рис. 18.213. МПА с совмещением магнитопроводов нагревающего индуктора и индуктора вращателя:

а – схема расположения индукторов, расплава металла и шлака;
б – установка индукторов на МПА

Таким очень кратким обзором завершаем Т. 3, Кн. 1.

Ещё раз отметим детальное освещение рассмотренных конструкций и методов в соответствующих ранее изданных материалах [18.1-18.3].

Библиографический список

18.1. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств (интегрированный энерго-экологический анализ: теория и практика). В 2 т. Т. 1 / В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2010. – 688 с.

18.2. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2, кн. 1 // Новые способы, модельные экспериментальные исследования / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 592 с.

18.3. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2, кн. 2: Анализ режимных параметров конструкций в энерготехнологиях: монография / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. Ч. 1. – 560 с.

18.4. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2, кн. 2: Анализ режимных параметров конструкций в энерготехнологиях: монография. / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. Ч. 2. – 156 с.

18.5. Александров А.Г. Справочник по теории автоматического управления / А.Г. Александров, В.М. Артемьев, В.Н. Афанасьев; под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.

18.6. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.

18.8. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы / под ред. В.В. Содовникова. – М.: ВШ, 1991. – 225 с.

18.9. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / К.А. Пупков [и др.]; под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Баумана, 2004. – 640 с.

18.10. Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей. – М.: МИР, 1993.

18.11. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. – 832 с.

18.12. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов / В.Я. Ротач. 2-е изд. – М.: изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.

18.13. Страшинин Е.Э. Основы теории автоматического управления: учебное пособие / Е.Э. Страшинин. Ч. 1: Линейные непрерывные системы управления. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 217 с.

18.14. Адаптивное управление точностью прокатки труб / Ф.А. Данилов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1980. – 289 с.

18.15. Лисиенко В.Г. Теплофизика металлургических процессов: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев. – М.: Metallurgy, 1982. – 240 с.

18.16. Лисиенко В.Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах / В.Г. Лисиенко. – М.: Metallurgy, 1979. – 224 с.

18.17. Усовершенствование методов сжигания мазута в мартеновских печах / В.Г. Лисиенко, Б.И. Китаев, Н.И. Кокарев, А.Г. Капичев. – М.: Metallurgy, 1967. – 246 с.

18.18. Лисиенко В.Г. Усовершенствование методов сжигания природного газа в сталеплавильных печах / В.Г. Лисиенко, Б.И. Китаев, Н.И. Кокарев. – М.: Metallurgy, 1977. – 280 с.

18.19. Стекловарение, теплотехника, моделирование, управление и экология: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Ю.В. Крючков, С.Н. Гущин, В.Б. Кутын; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: АИН им. А.М. Прохорова, 2010. – 452 с.

18.20. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 2 кн. – М.: Теплотехник, 2005. – 768 с.

18.21. Лисиенко В.Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 4 кн. – М.: Теплотехник, 2005. – Кн. 1. – 768 с.; Кн. 2. – 912 с.

18.22. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и экология / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 3 кн. Кн. 1. – М.: Теплотехник, 2005. – 608 с.

18.23. Лисиенко В.Г. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 4 кн. Кн. 2. – М.: Теплотехник, 2005. – 912 с.

18.24. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с.

18.25. Лисиенко В.Г. Улучшение теплоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, Ю.К. Маликов. – М.: Metallurgy, 1988. – 231 с.

18.26. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 2 кн. Кн.2. – М.: Теплотехника, 2004. – 592.

18.27. Температура: теория, практика, эксперимент / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. В 3 т. Т. 1, Кн. 2. Методы контроля температуры. – М.: Теплотехника, 2009. – 339.

18.28. Шлеймович Е.М. Термоэлектрические преобразователи для измерения температуры: учебное пособие / Е.М. Шлеймович, В.Г. Лисиенко, С.П. Санников; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГЛУ, 2008. – 122 с.

18.29. Лисиенко В.Г. Автоматизация и управление: история и персонажи кафедры: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, О.А. Гусев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 184 с.

18.30. Лисиенко В.Г. К истории создания и развития кафедры «Аппаратура автоматического управления» радиотехнического факультета УПИ им. С.М. Кирова / В.Г. Лисиенко, Е.Н. Виноградов, В.М. Романов. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1989. – 35 с.

18.31. Лисиенко В.Г. История создания и развития кафедры «Автоматика и управление в технических системах» РТФ УГТУ-УПИ: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, О.А. Гусев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 96 с.

18.32. Лисиенко В.Г. Принципы построения трехуровневых АСУ ТП объектов с распределенными параметрами на примере АСУ нагревом металла / В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 73 с.

18.33. Моделирование и автоматизированное управление: учебное пособие / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – Новоуральск: НИЯУ-МИФИ-НТИ, 2010. – 179 с.

18.34. Моделирование сложных вероятностных систем: учебное пособие / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.А. Морозовой. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 200 с.

18.35. Возможности экспертного управления сложными объектами на примере доменного процесса: учебное пособие / А.Е. Пареньков [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 67 с.

18.36. Развитие трехуровневых АСУ ТП в металлургии (коксовые и бескоксовые процессы): учебное пособие / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехника, 2006. – 328 с.

18.37. Сучков А.В. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи: моно-

графия / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Сучков. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.

18.38. Моделирование и разработка системы диагностики технологического процесса для управления качеством (на примере процесса непрерывного литья заготовок): учебное пособие / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – Новоуральск: ФГО ВПО НТТИ, 2008. – 132 с.

18.39. Структура трехуровневой АСУ ТП доменной печи с использованием логико-количественной экспертной системы: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, В.А. Морозова, Ю.Н. Овчинников; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 82 с.

18.40. Калинин Н.С. Методы и средства измерения расхода энергоносителей и тепловой энергии: учебное пособие / Н.С. Калинин, В.Г. Лисиенко; под ред. Ю.Н. Чеснокова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 80 с.

18.41. Лисиенко В.Г. Параметрическая идентификация и цифровая модель динамических объектов управления. Ч. 1: Математическое описание цифровых систем и случайные процессы: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Н.Н. Пономарев, П.А. Дюгай; под ред. В.Г. Лисиенко. – Новоуральск: ФГАУ ВПО НИЯУ «МИФИ» – НТИ, 2012. – 84 с.

18.42. Лисиенко В.Г. Параметрическая идентификация и цифровые модели динамических объектов управления: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Н.Н. Пономарев, П.А. Дюгай; под ред. В.Г. Лисиенко. Ч. 2: Особенности параметрической идентификации динамических объектов. – Новоуральск: ФГАУ ВПО НИЯУ «МИФИ» – НТИ, 2012. – 184 с.

18.43. Кузякин В.И. Основы теории и проектирования измерительных информационных технологий и систем / В.И. Кузякин, В.Г. Лисиенко, Ю.В. Крюченков. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 237 с.

18.44. Кузякин В.И. Информационно-измерительная техника и технологии: учебное пособие / В.И. Кузякин, В.Г. Лисиенко, В.П. Богомолов. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 133 с.

18.45. Лисиенко В.Г. Моделирование объектов с распределенными параметрами на примере трехуровневых АСУ нагревом материала: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, З.Г. Салихов, О.А. Гусев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – 163 с.

18.46. Моделирование систем с использованием информационных технологий: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Н.Г. Дружинина, О.Г. Трофимова, С.П. Трофимов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 440 с.

18.47. Шлеймович Е.М. Термоэлектрические преобразователи для измерения температур: учебное пособие / Шлеймович Е.М., В.Г. Лисиенко; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 114 с.

18.48. Новое в синергетике: взгляд в третье тысячелетие. – М.: Наука, 2002. – 428 с.

18.49. Теория моделей в процессах управления / Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. – М.: Наука, 1978. – 223 с.

18.50. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.

18.51. Пригожин И.Р. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур / И.Р. Пригожин, Д. Кондепуди. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

18.52. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. М.: Мир, 1980. – 406 с.

18.53. Хакен Г. Информатика и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. – М.: Мир, 1991. – 240 с.

18.54. Цымбал В.П. Введение в теорию самоорганизации с примерами из металлургии: учебное пособие / В.П. Цымбал. – Новокузнецк: СибГИУ, 2001. – 251 с.

18.55. Цымбал В.П. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников. – Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – 172 с. (ч. 1), 276 (ч. 2), 264 с. (ч. 3).

18.56. Патент на изобретение № 2285934 РФ. Устройство адаптации регулятора / В.Г. Лисиенко; заявл. 20.05.2005; опубл. 20.10.2006. Бюл. № 29.

18.57. Колесников А.А. Синергетическая теория управления / А.А. Колесников. Таганрог: ТРТУ. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

18.58. Современная прикладная теория управления; под ред. А.А. Колесникова. Ч. 1: Оптимизационный подход в теории управления. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 400 с.

18.59. Патент на изобретение № 2201291 РФ. Устройство автоматического управления процессом магнитного обогащения железных руд / В.Г. Лисиенко, Б.Б. Зобнин, В.А. Боровков, С.С. Головырин; заявл. 30.03.1999, опубл. 27.03.2003. Бюл. № 9.

18.60. Функциональная структура АСУ ТП производства окатышей на обжиговой конвейерной машине ОК-315 Лебединского ГОКа / А.П. Буткарев [и др.] // Наука и инженерное творчество – XX веку: труды первой науч.-техн. конф. УрО АИН РФ. – Екатеринбург: Изд-во УрО АИН РФ, 1995. – С. 68–69.

18.61. Основные принципы построения эффективных АСУ ТП окускования железорудных материалов / А.П. Буткарев [и др.] // Металлургическая теплотехника: сб. научных трудов. НМетАУ. Т. 5. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. – С. 18–24.

18.62. Опыт эксплуатации АСОУТП термообработки окатышей на обжиговой конвейерной машине ОК-306 Лебединского ГОКа / А.А. Буткарев [и др.] // сб. научных трудов. НМетАУ. Кн. 1. – Днепропетровск: Пороги, 2005. – С. 64–70.

18.63. Буткарев А.А. Техническая и функциональная структура АСУ ТП термообработки окатышей на конвейерной машине ОК-306 Лебединского ГОКа, учитывающая использование математических моделей / А.А. Буткарев, В.Г. Лисиенко // С творческим наследием Б.И. Китаева – в XXI век // Материалы международной конференции. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 200–206.

18.64. Основные тенденции и практика совершенствования технологий и оборудования для производства окускованного сырья в России / В.П. Бруев [и др.] // Сталь. 2006. № 6. – С. 5–9.

18.65. Технологические основы автоматизации модернизированной обжиговой машины ОК-116 № 5 АО «ССГПО» / А.А. Буткарев, А.П. Буткарев, В.Г. Лисиенко [и др.] // Связь-Пром 2009: научные труды международной научно-практической конференции. В 2 т. – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2009. Т. 2. – С. 30–32.

18.66. Оптимизация режимов термообработки окатышей с применением математических моделей / А.А. Буткарев, А.П. Буткарев, В.Г. Лисиенко, Ю.П. Лазебная // Связь-Пром 2011 в рамках VIII Евро-Азиатского форума: международная научно-практическая конференция. – Екатеринбург: Союз-промэкспо, 2011. – С. 31–33.

18.67. Китаев Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Л. Лазарев. – М.: Metallurgy, 1966. – 355 с.

18.68. Китаев Б.И. Управление доменным процессом / Б.И. Китаев. – Свердловск: УПИ, 1984. – 94 с.

18.69. Lisienko V.G. Mathematical Modeling of Energy-Technological Units and Control Models in Energy Saving // Scientific and

Technological Achievements Related to the Development of European Cities / V.G. Lisienko. NATO ASI Series. 4 Science and Technology Policy. Vol. 9. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1996. – P. 235–248.

18.70. Математическая модель теплообмена в плотном слое и ее использование для оптимизации конструктивных и технологических параметров процессов в термообработке / А.А. Буткарев, А.П. Буткарев, В.Г. Лисиенко, Г.М. Майзель // С творческим наследием Б.И. Китаева – в XXI век // Материалы международной конференции. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 144–150.

18.71. Калиткин Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин; под ред. А.А. Самарского. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

18.72. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработки окатышей на обжиговых конвейерных машинах / А.А. Буткарев // Сталь, 2011. № 15. – С. 4–8.

18.73. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

18.74. Берман Ю.А. Основные закономерности производства окатышей / Ю.А. Берман. – М.: Металлургия, 1991. – 202 с.

18.75. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей / Ю.С. Юсфин [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 313 с.

18.76. Исаев Е.А. Современная теория окомкования сыпучих материалов / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт. – Ст. Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2001. – 244 с.

18.77. Пат. на изобретение № 2154814 РФ. Способ и система для определения геометрических размеров частиц окомкованного и/или гранулированного материала / В. Лисиенко, В. Круглов, Д. Кири́н; заявл. 24.09.1996; опубл. 20.08.2000. Бюл. № 23.

18.78. Патент ФРГ. Verfahren und System zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen von Teilchen eines pelletierten und/oder granulierten Materials / W. Lissienko, W. Kruglow, D. Kirin. Von GR PA 195E8593; DE 28.09.1995. 195362381.

18.79. Patent Australian. Patent Office. Application No AV 199676190B2. Patent No 702574 / W. Lissienko, W. Kruglow, D. Kirin. Application Date: 1996.09.24.

18.80. Пат. на изобретение № 2261432 РФ. Способ и система для определения геометрических размеров гранул материала / В. Н. Круглов; заявл. 06.05.2002; опубл. 27.09.2005.

18.81. Анализ промышленных испытаний бесконтактной гранулометрической компьютерной системы «Индикатор крупности» / В. Н. Круглов, В.Г. Лисиенко, А.В. Стародумов, С.Н. Евстюгин // Международный журнал экспериментального образования. 2010. № 1. – С. 90–94.

18.82. Способ внедрения контуров на изображение сырых железорудных материалов / Д.Ю. Кирин, В.Н. Круглов, В.Г. Лисиенко // Информационные технологии и электроники: Вторая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 97.

18.83. Кирин Д.Ю. Основные концепции построения системы измерения гранулометрического состава железорудных окатышей / Д.Ю. Кирин, В.Н. Круглов, В.Г. Лисиенко // Там же. – С. 98.

18.84. Разработка систем контроля и управления окомкованием металлургических окатышей / В.Г. Лисиенко [и др.] // Информационные технологии и электроника: материалы IV научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – С. 60.

18.85. Применение системы «Гранулометр» для непрерывного бесконтактного определения гранулометрического состава кусковых материалов / С.Н. Евстюгин, А.В. Стародумов, В.Н. Круглов, Н.Ф. Дощицин // Сталь. № 1. 2003. – С. 36–38.

18.86. Технологические аспекты применения системы «Гранулометр» / В.А. Горбачев [и др.] // Сталь. № 12, 2008. – С. 37–38.

18.87. Методика и система управления процесса окомкования кусковых материалов (окатышей) / В.Г. Лисиенко [и др.] // На передовых рубежах науки и инженерного творчества: труды второй международной научно-технической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С. 124–126.

18.88. System for Determining the Geometric Dimensions of Particles of Pelletized or Granulated Material / V. Lissiyenko, V. Kruglov, D. Kirin, I. Lukuantsev // ISES, 2002, July 9–11, Ulaanbaatar, Mongolia – P. 420–422.

18.89. Автоматизированная система управления процессами получения сырых окатышей «Индикатор крупности» / А.В. Стародумов, С.Н. Евстюгин, В.Н. Круглов, В.Г. Лисиенко // Сталь. 2008. № 12. – С. 37–39.

18.90. Моделирование гранулометрического состава окатышей, формируемых чашевым окомкователем / А.В. Стародумов, А.А. Солодухин, И.Д. Степанов, В.Г. Лисиенко // Сталь. 2003. № 1. – С. 22–25.

18.91. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 622 с.

18.92. Пат. на изобретение № 2204438 РФ. Устройство для автоматического управления процессом дробления материалов / Б.Б. Зобнин, В.М. Куркин, В.А. Боровков; заявл. 14.09.2001; опубл. 20.05.2003.

18.93. Оценка качества дробленой руды с помощью системы «Индикатор крупности» / А.В. Стародумов [и др.] // Сталь. 2006. № 6. – С. 47–48.

18.94. Формирование гранулометрического состава окатышей на фабриках окомкования / В.А. Горбачев [и др.] // Горный журнал. 2003. № 4–5. – С. 89–91.

18.95. Суханов Е.Л. Автоматизация технологических процессов: конспект лекций и справочные данные / Е.А. Суханов. – Екатеринбург: УГТУ, 2004. – 139 с.

18.96. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдский, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 243 с.

18.97. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 617 с.

18.98. Основы реализации интеллектуальных систем управления доменным процессом / Е.Л. Суханов, В.Г. Лисиенко, В.Г. Грязнев, Л.П. Суханова // Теплофизика и информатика в металлургии: достижения и проблемы. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. – С. 206–213.

18.99. Лисиенко В.Г. Разработка верхнего уровня АСУ ТП доменной печи / В.Г. Лисиенко, Е.Л. Суханов, А.Н. Кузнецов; под ред. Б.Н. Парсункина // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии: межвуз. сб. научных трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – С. 18–27.

18.100. Загайнов С.А. Перспективные методы анализа технологии доменной плавки пути ее совершенствования / С.А. Загайнов, В.Г. Лисиенко, Ю.Г. Ярошенко; под ред. В.Г. Лисиенко // Вестник УГТУ-УПИ. «На передовых рубежах науки и инженерного творчества»: труды третьей международной научно-практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженер-

ных наук им. А.М. Прохорова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. № 15(45). Ч. 1. – С. 198–200.

18.101. Ченцов А.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса / А.В. Ченцов, Ю.В. Чесноков, С.В. Шаврин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.

18.102. Дмитриев А.Н. Балансовая (равновесная) математическая модель / А.Н. Дмитриев // Математическое моделирование доменного процесса: научный доклад Института металлургии УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 6–21.

18.103. Дмитриев А.Н. Математическая модель газодинамики / А.Н. Дмитриев // Математическое моделирование доменного процесса: научный доклад Института металлургии УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 21–26.

18.104. Дмитриев А.Н. Математическая модель теплообмена / А.Н. Дмитриев // Математическое моделирование доменного процесса: научный доклад Института металлургии УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. – С. 26–29.

18.105. Дмитриев А.Н. Исследование температурных и скоростных полей с помощью двумерной математической модели при использовании новых технических решений / А.Н. Дмитриев, С.В. Шаврин // Сталь. 1998. № 5. – С. 5–8.

18.106. Дмитриев А.Н. Использование математического моделирования при разработке совершенствовании пирометаллургических процессов переработки комплексного сырья / А.Н. Дмитриев // Вестник УГТУ-УПИ. «На передовых рубежах науки и инженерного творчества»: труды третьей международной научно-практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. № 15(45). Ч. 1. – С. 145–148.

18.107. Разработка верхнего уровня автоматизированных систем управления теплотехнологическими процессами / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. Н.П. Гусенковой // Вопросы теплообмена, энергосбережения и экологии в теплотехнических процессах: сб. научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной памяти проф. Л.А. Бровкина. – Иваново, 2003. – С. 11–13.

18.108. Лисиенко В.Г. Экспертные системы технологических процессов. Автоматика и информационные технологии / В.Г. Лиси-

енко, А.Е. Пареньков, В.П. Чистов // Научные школы УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – С. 195–205.

18.109. Lisienko V.G. Development of Expert System and Artificial Intelligence in Metallurgy and Other Spheres of Activity the Person / V.G. Lisienko, V.P. Chistov, A.E. Parenkov // Modeling, Advanced Process Technology, Expert and Control System of Heat and Mass Transfer Phenomena: Collection of Materials of International Seminar. – Ekaterinburg: RUD of AES and USTU, 1996. – P. 87–88.

18.110. Морозова В.А. Разработка интегрированных моделей представления знаний для логико-количественных экспертных систем управления энергонасыщенными объектами / В.А. Морозова // «СВЯЗЬ – ПРОМ 2011: сб. научных трудов международной научно-практической конференции в рамках VIII Евро-Азиатского форума «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2011». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Рел-Медиа», 2011. – С. 80–83.

18.111. Роменец В.А. «Ромелт» – процесс жидкофазного восстановления железа / В.А. Роменец. – М.: МИСиС, 2003. – С. 1–10.

18.112. Разработка экспертной системы на основе логического интеллекта для управления доменной печью / В.П. Чистов [и др.] // Наука и инженерное творчество – XXI веку: первая научно-техническая конференция РУО АИН РФ. – Екатеринбург: РУО АИН РФ, 1995. – С. 89–92.

18.113. Лисиенко В.Г. Разработка компьютерных программ третьего имитационно-оптимизационного уровня управления для металлургических технологий / В.Г. Лисиенко, В.П. Чистов, А.Е. Пареньков // Перспективы автоматизации в оборудовании, науке и производстве: материалы юбилейной региональной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СГИУ, 1999. – С. 104–105.

18.114. Концепция построения и модель экспертной системы агрегатов ПЖВ / В.П. Чистов [и др.] // Вестник УГТУ. Научные школы УГТУ-УПИ: материалы международной конференции. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. № 2. – С. 182–190.

18.115. Conception of Expert System Creation by the Example of Iron-Smelting Units / V.P. Chistov [et al.] // Mathematical Modeling, Control and Advanced Technological Processes. Series: Heat and Mass Transfer, Energy and Environment. Collection of Scientific Works; No 1. Ed. V.G. Lisienko. – Yekaterinburg: USTU, 1999. – P. 222–237.

18.116. Построение логических экспертных систем для управления технологическими процессами в доменных печах / В.Г. Лисиенко [и др.] // Производство чугуна на рубеже столетий: труды V Международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 403–405.

18.117. Лисиенко В.Г. Экспертные системы технологических процессов / В.Г. Лисиенко, А.Е. Пареньков, В.П. Чистов // Автоматика и информационные технологии. Научные школы УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – С. 195–205.

18.118. Lisienko V.G. Development of Expert and Artificial Intelligence in Metallurgy and Other Spheres of Activity the Person / V.G. Lisienko, V.P. Chistov, A.E. Parenkov // Collection of Materials of International Seminar: Modeling, Advanced Process Technology, Expert and Control System of Heat and Mass Transfer Phenomena. – Ekaterinburg: RUD of AES and USTU, 1996. – P. 87–88.

18.119. Логико-матричный противоаварийный тренажер-советчик на примере чугуновыплавляющих агрегатов / В.Г. Лисиенко, А.Е. Пареньков, В.П. Чистов, В.В. Бабанакров // Перспективы автоматизации в образовании, науке и производстве: материалы юбилейной региональной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СГИУ, 1999. – С. 45.

18.120. Конструктор экспертных систем промышленного назначения / Г.Б. Захарова, В.В. Майборода, В.П. Чистов, Р.Н. Шакиров // Новые информационные технологии в исследовании дискретных структур: доклады Всероссийской конференции. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – С. 35–39.

18.121. Принципы построения экспертных систем в металлургии на примере экспертной системы «Советчик мастера доменной печи»: учебное пособие / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1996. – 45 с.

18.122. Экспертные логические системы диагностики аварий на примере агрегатов, выплавляющих чугун / В.Г. Лисиенко [и др.] // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. – Новокузнецк: СибГИУ, 2001. – С. 335–342.

18.123. Логико-матричные экспертные системы диагностики аварий на примере агрегатов, выплавляющих чугун / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. Б.Н. Парсункина // Автоматизация технологических

и производственных процессов в металлургии: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – С. 34–42.

18.124. Разработка логических моделей для экспертного управления сложными энерготехнологическими объектами и их использование в системах диагностики аварий на примере агрегатов, выплавляющих чугун / В.Г. Лисиенко [и др.] // Известия АИН РФ. Юбилейный том, посвященный 85-летию академика А.М. Прохорова и 10-летию возглавляемой им Академии инженерных наук РФ. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. университет, 2001. – С. 151–163.

18.125. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: учебное пособие / Н.А. Спирин [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФу, 2014. 580 с.

18.126. Пат. на изобретение № 2209837 РФ. Способ управления энерготехнологическим агрегатом – доменной печью / В.Г. Лисиенко [и др.]; заявл. 31.10.2001, опубл. 10.08.2003. Бюл. № 22.

18.127. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов / В.М. Глушков. – М. Физматгиз, 1962. – 472 с.

18.128. Рыбников К.А. Введение в комбинаторный анализ / К.А. Рыбников. – М.: МГУ, 1985. – 308 с.

18.129. Компьютерный тренажер для операторов технологических процессов доменного производства / В.П. Чистов, Г.В. Захарова, И.А. Кононенко, В.Г. Титов // Программные продукты и системы. 2002. № 3. – С. 42–45.

18.130. Микрин Е.А. Перспективы применения диагностической экспертной системы для наземного комплекса отработки бортового программного обеспечения международной космической станции / Е.А. Микрин, А.С. Кнутов // Проблемы управления. 2005. № 1. – С. 77–82.

18.131. Малюгин В.Д. Разработка экспертной системы (тренажера) доменной печи с применением модели шлакоперерабатывающей установки / В.Д. Малюгин, Е.Б. Иванов, А.Е. Пареньков // Автоматизация в промышленности: сборник научных трудов. – М.: ИПУ РАН, 2007. – С. 122–126.

18.132. Использование экспертов-наблюдателей при управлении ходом доменной плавки / Е.Л. Суханов, В.Г. Лисиенко, Л.П. Суханова, К.В. Горностаев; под ред. В.Г. Лисиенко // Вестник УГТУ-УПИ «На передовых рубежах науки и инженерного творчества»: труды

третьей международной научно-практической конференции РУО АИН им. Прохорова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. № 15(45). Ч. 1. – С. 233–234.

18.133. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев. – Свердловск-М.: Metallurgizdat, 1945. – 152 с.

18.134. Китаев Б.И. Теплообмен в шахтных печах / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, В.Д. Сучков. – Свердловск-М.: Metallurgizdat, 1957. – 280 с.

18.135. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев [и др.]. – М.: Metallurgiya, 1978. – 248 с.

18.136. Качественная и количественная оценка воздействий на тепловое состояние шахты доменной печи / В.С. Швыдкий [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 8. – С. 28–32.

18.137. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников [и др.]. – Челябинск: Metallurgiya, 1989. – 120 с.

18.138. Модельные оценки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирины [др.]; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 243 с.

18.139. Рациональный алгоритм управления тепловым состоянием доменной печи с использованием информационно-управляющих машин / Е.Л. Суханов [и др.] // IV конгресс ИФАК: краткое содержание докладов. – Варшава: главная техническая организация Польши, 1969. – С. 196.

18.140. Концепция построения и модель экспертной системы для ПЖВ / В.П. Чистов [и др.] // Научные школы УГТУ-УПИ. № 2. С творческим наследием Б.И. Китаева – в XXI век. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 182–189.

18.141. Разработка и использование искусственного интеллекта для агрегата газификатора ПЖВ / Е.А. Пареньков [и др.] // Информационные технологии и электроника: Вторая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 104–105.

18.142. Получение и использование горячих восстановительных газов с применением экспертных систем для получения легированных чугунов / А.В. Ростовский [и др.] // Информационные технологии и электроника: Вторая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 102–103.

18.143. Энергоэкологические функции металлургических агрегатов с жидкой шлаковой ванной / А.Е. Пареньков [и др.] // Научные школы УГТУ-УПИ. № 2. С творческим наследием Б.И. Китаева – в XXI век. – Екатеринбург: УГТУ, 1998. – С. 151–156.

18.144. Мойкин В.И. Динамические характеристики доменной печи по результатам математического моделирования / В.И. Мойкин, Н.М. Бабушкин, Б.А. Боковиков // Вопросы производства чугуна в доменных печах. – М.: Металлургия, 1984. – С. 46–52.

18.145. Разработка математической модели с переменной структурой для анализа и прогноза показателей работы доменной печи на основе отчетных данных / Л.Ю. Гилева, Ю.Г. Ярошенко, С.А. Зайганов, Е.Л. Суханов // Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 4. – С. 51–55.

18.146. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей / С.А. Загайнов [и др.] // Сталь. 2000. № 9. – С. 12–14.

18.147. Лисиенко В.Г. Разработка концепции и моделей логико-количественных экспертных систем для управления сложными энергонасыщенными объектами / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, О.Г. Дружинина // Новые методы передачи и обработки информации: сборник результатов научных исследований сотрудников радиотехнического факультета УГТУ-УПИ. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – С. 49–58.

18.148. Lisienko V.G. Quantitative Part of Expert System and Conception of Coupling Automatic Control of Blast Furnaces / V.G. Lisienko, V.A. Morozova and O.G. Druzhinina // Proceedings papers / 3RD Balkan metallurgical conference, Ohrid, Macedonia, September 24-27, 2003 [editor-in-chief Jovan K. Mickovski]. – P. 221–226.

18.149. Лисиенко В.Г. Моделирование управления тепловым режимом доменной печи с использованием связного регулирования / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, О.Г. Дружинина // Проблемы промышленной теплотехники: Третья международная конференция 29.09.2003 – 04.10.2003. – Киев. Украина // Промышленная теплотехника, 2003. Т. 25. № 4. Приложение к журналу. – С. 412–413.

18.150. Lisienko V.G. Logical-quantitative Human-machine Expert System of Energy-saturated Objects/ V.G. Lisienko, V.A. Morozova and O.G. Druzhinina // Proceeding of the 11th Word Congress in Mechanism

and Machine Science. April 1–4, 2004. Tianjin, China. China Machine Press, edited by Tian Huang. Vol. 2. – P. 969–972.

18.151. Лисиенко В.Г. Логико-количественные человеко-машинные экспертные системы энергонасыщенных объектов / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, О.Г. Дружинина; под ред. В.Г. Лисиенко // Вестник УГТУ-УПИ. «На передовых рубежах науки и инженерного творчества»: труды третьей международной научно-практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. № 15(45). Ч. 1. – С. 164–167.

18.152. Лисиенко В.Г. Модели для логико-количественных человеко-машинных экспертных систем управления энергонасыщенными объектами / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, О.Г. Дружинина // Связь-Пром 2004: научные труды международной научно-практической конференции в рамках 1-го Евро-Азиатского международного форума «Связь-Промэкспо 2004». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2004. – С. 18–26.

18.153. Лисиенко В.Г. Табличный метод реализации стратегических и оперативных целей управления энергонасыщенными объектами / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова // Связь-Пром 2004: научные труды международной научно-практической конференции в рамках 1-го Евро-Азиатского международного форума «Связь-Промэкспо 2004». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2004. – С. 27–33.

18.154. Лисиенко В.Г. Разработка логико-количественных экспертных систем управления восстановительными, в том числе бескоксowymi процессами в металлургии / В.Г. Лисиенко [и др.]; под общей ред. С.П. Мочалова // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 36–41.

18.155. Лисиенко В.Г. Логико-количественные экспертные системы и виртуальные модели управления на примере металлургии / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова // Связь-Пром 2006: научные труды международной научно-практической конференции в рамках 3-го Евро-Азиатского Международного форума «Связь-Промэкспо 2006». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2006. – С. 38–41.

18.156. Попов В.В. Оценка эффективности использования энергетических ресурсов при выплавке легированной и нелегированной

стали альтернативными методами / В.В. Попов, В.Г. Лисиенко // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: сб. докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 379–386.

18.157. Лисиенко В.Г. Разработка концепции моделирования связанного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь / В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, О.Г. Дружинина. // Математическое моделирование и управление в сложных системах: сб. научных трудов; под ред. С.Н. Музыкина, В.В. Филатова, А.С. Филатовой. – М.: МГАПИ, 2001. – С. 134–144.

18.158. Lisienko V.G. The Conception of Automatic Control of Energy Carries Feed in Blast Furnace / V.G. Lisienko // 6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. Vol. II: Furnace and Boiler Operation. Preprint. 02-05 April. 2002, Estoril-Lisbon-Portugal.

18.159. Пат. на изобретение № 2205228 РФ. Способ связанного автоматического управления подачей энергоносителей доменную печь / В.Г. Лисиенко [и др.]; заявл. 26.07.2001, опублик. 27.05.2003. Бюл. № 15.

18.160. Ахметзянов Ф.М. Ведение доменной печи. Технологическая инструкция ТИ 101-П-Д-22-97 / Ф.М. Ахметзянов, М.Ф. Гибадулин, А.Ф. Сарычев. – Магнитогорск: ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», 1997. – 125 с.

18.161. Жеребин Б.Н. Неполадки и аварии в работе доменных печей: причины, меры предупреждения и ликвидации: учебное пособие / Б.Н. Жеребин, А.Е. Пареньков, В.В. Бабанак; под ред. В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 397 с.

18.162. Диагностика аварийных ситуаций доменной печи с использованием экспертной системы / А.Н. Ладонкин, Б.Н. Жеребин, В.П. Чистов, А.Е. Пареньков. – Металлургия, 1997. № 12. – С. 46.

18.163. Разработка экспертной системы на основе логического интеллекта для управления доменной печью / В.П. Чистов [и др.]: сборник трудов первой научно-практической конференции АИН РФ «Наука и инженерное творчество – XXI веку». – Екатеринбург: РУО АИН, 1995. – С. 89–92.

18.164. Сучков А.В. Проблемы построения системы принятия решений для доменного производства / А.В. Сучков // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 10. – С. 72–81.

18.165. Логико-матричный противоаварийный тренажер – советчик на примере чугуновыплавляющих агрегатов / В.Г. Лисиенко, А.Е. Пареньков, В.П. Чистов, В.В. Бабанакон // Перспективы автоматизации в образовании, науке и производстве: материалы юбилейной региональной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СГИУ, 1999. – С. 45.

18.166. Сучков А.В. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи / А.В. Сучков, В. Г. Лисиенко, В.А. Сучков. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.

18.167. Морозова В.А. Использование когнитивного моделирования при разработке логико-количественных экспертных систем / В.А. Морозова, В.Г. Лисиенко, А.В. Сучков // Связь-пром 2008: научные труды международной научно-практической конференции в рамках 5-го Евро-Азиатского Международного форума «Связь-Промэкспо 2008». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа», 2008. – С. 75-78.

18.168. Сучков А.В. Реализация системы поддержки принятия решений в доменном производстве / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. Т. 315. № 5. – С. 93-98.

18.169. Усовершенствование математической модели доменной печи и построение детерминированного советчика мастера доменной печи / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, В.А. Морозова, А.В. Огарев // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VII Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 252–256.

18.170. Лисиенко В.Г. Развитие модельной поддержки экспертных систем управления энергонасыщенными объектами / В.Г. Лисиенко, В.А.Морозова, А.В. Сучкова, А.В. Огаров // Автоматизация технологических производственных процессов в металлургии: межвуз. сборник научных трудов / под ред. Б.Н. Парсункина. – Магнитогорск: МГТУ, 2009. – С. 4–9.

18.171. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545 с.

18.172. Воскобойников В.Г. Общая металлургия / В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, Я.М. Якушев. – М.: Металлургия, 1998. – 768 с.

18.173. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учебное пособие / Б.И. Китаев [и др.]; под ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.

18.174. Теплотехнический справочник: в 2 т. Т.1 / В.В. Галактионов [и др.]; под общ. ред. В.Н. Юренина, П.Д. Лебедева. 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1975. – 743 с.

18.175. Металлургия чугуна / В.Ф. Вегман [и др.]. – М.: Металлургия, 1989. – 512 с.

18.176. Металлургия чугуна: учебник для вузов. 3-е изд. / В.Ф. Вегман [и др.]. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.

18.177. Технология обеспечения энергэкологической эффективности черной металлургии / Я.М. Щелоков, В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, А.В. Лаптева // Материалы 12 международного симпозиума «Инженерная экология – 2015» (совместно со школой-семинаром молодых ученых). – М.: РН ТОНЭС им. А.С. Попова. – С. 125–128.

18.178. Воробьев С.Н. Управленческие решения: учебник для вузов / С.Н. Воробьев, В.Б. Уткин, К.В. Балдин. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 317 с.

18.179. Сучков А.В. Алгоритмическое и программное обеспечение системы поддержки принятия решений в доменном производстве / А.В. Сучков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиотехники. 2009. № 2(20). – С. 148–153.

18.180. Сырьевая база производства пылеугольного топлива для вдувания в горн доменных печей / М.Б. Школлер, Ю.Е. Прошунин, С.Г. Степанов, С.Р. Исламов // Пылеугольное топливо – альтернативы природному газу при выплавке чугуна: труды международной научно-практической конференции. – Донецк: Унитех. 2006. – С. 144–151.

18.181. Перспективы и эффективность освоения пылеугольной технологии в доменном цехе Алчевского металлургического комбината / Т.Г. Шевченко [и др.] // Бюллетень «Черная металлургия». 2009. № 11. – С. 36–45.

18.182. Перспективы применения пылеугольного топлива в доменных печах Украины и России / А.А. Минаев [и др.] // Сталь. 2008. № 2. – С. 5–11.

18.183. Эффективность использования буроугольного топлива из буроугольного полукокса в доменной плавке / С.Л. Ярошевский,

С.Р. Исламов, А.В. Кузин, З.К. Афанасьева // Бюллетень «Черная металлургия». 2008. № 4. – С. 38–46.

18.184. Промышленный комплекс для приготовления и вдувания пылеугольного топлива в доменные печи / В.В. Брага, С.В. Генрих, В.У. Гаврищук, В.В. Кочура // Теория и практика производства чугуна: труды международной научно-технической конференции. – Кривой рог: КГГМК «Криворожсталь, 2004. – С. 524–530.

18.185. Технологические и энергетические аспекты замены кокса каменным углем / С.А. Загайнов, В.Г. Лисиенко, С.В. Шаврин, А.Б. Соляников // Академия инженерных наук на Урале: научно-практическая инженерная деятельность на рубеже веков. В 4-х т. Т. 4. Ч. II: труды международной научно-практической конференции. «Топливо-металлургический комплекс: под ред. В.Г. Лисиенко и Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург. 2007. – С. 198–203.

18.186. Пат. на изобретение № 2301269 РФ. Способ инжектирования угольного топлива в доменную печь / В.Г. Лисиенко; заявл. 21.11.2005, опубл. 20.06.2007. Бюл. № 17 5 с.

18.187. Сучков А.В. Исследование работы доменных печей при вдувании угольной пыли / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко, А.Н. Дмитриев // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды международной научно-практической конференции 11–14 февраля 2009. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 267–274.

18.188. Богданов С.В. Инвестиционная привлекательность пылеугольного топлива в современных условиях / С.В. Богданов, С.М. Корнилов // Металлург. 2008. № 9. – С. 27–30.

18.189. Проблемы замещения кокса углями и газами в доменных печах Украины / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, А.Е. Меркулов, О.В. Лялюк // Бюллетень «Черная металлургия». 2008. № 1. – С. 17–20.

18.190. Ковалев В.В. Финансовый анализ / В.В. Ковалев. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 512 с.

18.191. Стоянова С.С. Финансовый менеджмент для практиков / С.С. Стоянова, М.Г. Штерн. – М.: Перспектива, 1999. – 239 с.

18.192. Производство и использование самовосстанавливающихся окатышей в доменной печи, работающей с применением пылеугольного топлива / Д.А. Ковалев [и др.] // Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна: труды международной научно-технической конференции. – Донецк: Уни-тех. 2006. – С. 77–90.

18.193. Лепило Н.Н. Моделирование доменной плавки при вдувании пылеугольного топлива / Н.Н. Лепило // Пылеугольное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна: труды международной научно-технической конференции. – Донецк: Уни-тех. 2006. – С. 240–247.

18.194. Сучков А.В. Подход к разработке компьютерного тренажера для повышения и оценки квалификации персонала доменных печей на основе математической модели / А.В. Сучков, В.Г. Лисиенко // Наука и производство Урала: сб. трудов межрегиональной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Новотроицк: НФ МИСиС. 2007. – С. 102–106.

18.195. Прогнозные оценки и расчеты процесса получения высокофосфористого чугуна с прямым легированием редкоземельными материалами (РЗМ) / А.Е. Пареньков [и др.] // АИН на Урале: Научно-практическая и организационная деятельность на рубеже веков. В 4 т. Т. 4, ч. II: труды международной научно-практической конференции «Топливно-металлургический комплекс» / под ред. В.Г. Лисиенко и Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: Изд-во Инженерная мысль, 2007. – С. 310–316.

18.196. Лопухов Г.А. Плазменная плавка (Итоги науки и техники). Сер. Теория металлургических процессов / Г.А. Лопухов, С.Н. Падерин. Т. 5. – М.: ВИНТИ, 1982. – 388 с.

18.197. Сафонов Е.Н. Использование плазмы при производстве чугуна по Франции / Е.Н. Сафонов. Вып. 9. – М.: Черметинформация, 1989. – С. 6–8.

18.198. Ростовский А.В. Уточнение теоретической температуры горения в период задувки доменной печи / А.В. Ростовский, А.Е. Пареньков, П.И. Черноусов // Металлург, 1998. № 12. – С.

18.199. Лопухин Н.М. ПАТТЕРН – метод планирования и прогнозирования научных работ / Н.М. Лопухин. – М.: Советское радио, 1971. – 160 с.

18.200. Лисиенко В.Г. К вопросу о регулировании процесса горения в рабочем пространстве мартеновской печи / В.Г. Лисиенко, Б.В. Кутын // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 4. – С. 165–169.

18.201. Пат. на изобретение № 2006007 РФ. Способ определения температуры жидкости / О.Э. Шлик [и др.]; заявл. 03.01.1992, опубл. 15.01.1994.

18.202. Температура: теория, практика, эксперимент: справочное издание. В 3-х т. Т. 1, Кн. 3. Методы контроля температуры / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2009. – 537 с.

18.203. Accusteed – Systems Articles [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.accusteed-systems.com/index_files/Page833/htm. – Загл. с экрана.

18.204. Анчуков А.В. Об изучении дискретного тона сверхзвуковой струей, истекающей из конического сопла / А.В. Анчуков, В.Г. Пимштейн // Изв. АН СССР: Механика жидкостей и газа. 1975. № 1. – С. 153–156.

18.205. Пат. на полезную модель № 130071 РФ. Устройство непрерывного корректируемого акустического определения температуры расплава / В.Г. Лисиенко; заявл. 01.08.2012; опубл. 10.07.2013.

18.206. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: справочное издание / А.М. Беленький [и др.]. В 3-х т. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / под ред. А.М. Беленького, В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 736 с.

18.207. О синхронности изменения тепловых потоков на ванну и кладку мартеновской печи / С.Н. Гушин [и др.] // Подготовка сырья, теплотехника – резервы металлургии. – М.: Металлургия. 1966. – С. 94–101.

18.208. Лисиенко В.Г. Некоторые статические и динамические характеристики рабочего пространства мартеновской печи / В.Г. Лисиенко, С.Н. Гушин, А.И. Черноголов // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 6. – С. 155–159.

18.209. А.с. № 220999 РФ. Способ контроля и наладки тепловой работы мартеновской печи / А.И. Черноголов [и др.]; заявл. 17.10.1966, опубл. 01.02.1968. Бюл. № 21.

18.210. Lisienko V.G. Zone-Mode Method for Calculation of Radiant Gas Flows in Complex Geometry Dusts / V.G. Lisienko, G.K. Malikov, Yu.K. Malikov // Numerical Heat Transfer. An International Journal of Computation and Methodology. Part B: Fundamentals. 1992. Vol. 22. No 1. – P. 1–24.

18.211. Лисиенко В.Г. Непрерывное определение теплопоглощения ванны мартеновской печи / В.Г. Лисиенко, Н.И. Кокарев // Сталь. 1960. № 1. – С. 89–92.

18.212. Гушин С.Н. Определение количества и теплосодержания дымовых газов методом локальных замеров / С.Н. Гушин, В.Г. Ли-
792

Лисиенко, А.И. Черно-голов // Известия вузов. Черная металлургия. 1971. № 5. – С. 170–173.

18.213. А.с. № 358603 РФ. Карпушин В.К. Способ отопления мартеновской печи / В.К. Карпушин [и др.]; заявл. 02.12.1969, опубл. 03.11.1972. Бюл. № 34.

18.214. Расчет и исследование теплообмена при плавке металлизированных окатышей в дуговых сталеплавильных печах / С.Г. Братчиков [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 1982. – С. 112–116.

18.215. Лисиенко В.Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование плавильных комплексов: справочное издание / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгачев; под ред. В.Г. Лисиенко. Т. 1. Кн. 2, кн. 3. – М.: Теплотехник. 2006. – Кн. 2 755 с.; 2007. – Кн. 3 865 с.

18.216. Математическая модель дуговой сталеплавильной печи с использованием металлизированных окатышей / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, В.Н. Шимов, И. Игнатов // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. № 8. – С. 135–139.

18.217. Лисиенко В.Г. Теплотехнические основы технологии и конструирование машин непрерывного литья заготовок: учебное пособие / В.Г. Лисиенко, Ю.А. Самойлович. Красноярск: Красноярский университет, 1986. – 120 с.

18.218. Лисиенко В.Г. Разработка автоматизированной системы управления агрегата вакуумной обработки металла на ОАО «ММК» / В.Г. Лисиенко, С.В. Хомлев, Е.А. Горемова // Информационные технологии и электроника: материалы IV Всероссийской студенческой научно-технической конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2000. – С. 63–64.

18.219. Вахнин О.С. Разработка программного модуля автоматизированной системы контроля положения разливочного узла установки сверхбыстрой заковки сплавов / О.С. Вахнин, В.Г. Лисиенко, А.В. Лавров // Системы и устройства радиолокации, связи и управления. – Свердловск: УПИ им. С.М. Кирова, 1990. – С. 21–22.

18.220. Исследование, разработка и реализация многофункционального прибора для оценки температуры и расхода расплава в плавильной печи [Электронный ресурс] / Л.Г. Доросинский [и др.]. Режим доступа: <http://hdl.handle.net/10995/22049>. Загл. с экрана.

18.221. О новых способах контроля качества слитка при вакуумном дуговом переплаве / М.М. Тельманов [и др.] // Расплавы. 2004. № 4. – С. 4–9.

18.222. Особенности распределения напряжения дуги и частоты капельных замыканий в зависимости от силы тока и межэлектродного промежутка при вакуумном дуговом переплаве / В.Г. Лисиенко [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. 2003. № 5. – С. 80–84.

18.223. Исследование ионизации и ее влияния на падение напряжения и частоту капельных замыканий при вакуумном дуговом переплаве жаропрочных сплавов стали / В.Г. Лисиенко [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. 2003. № 6. – С. 75–77.

18.224. Пат. на изобретение № 2227167 РФ. Способ контроля и регулирования межэлектродного промежутка в процессе вакуумной дуговой плавки и устройство для его осуществления / А.Ю. Ташкинов [и др.]; заявл. 21.10.2002, опубл. 20.04.2004. Бюл. № 11.

18.225. Альтернативные методы диагностики состояния многофакторного процесса / Г.Л. Хазан, В.Г. Лисиенко, А.Г. Бабенко, В.Ю. Бажин // Расплавы. 2006. № 4. – С. 77–81.

18.226. Свидетельство об официальной регистрации для ЭВМ. 2007611221 «NNControl» / А.Г. Бабенко, Г.Л. Хазан, В.Ю. Бажин, В.Г. Лисиенко; заявл. 26.01.2007. Зарегистрировано 22.03.2007.

18.227. Построение системы управления качеством заготовок алюминиевой фольги, изготовленных методом непрерывного литья / В.Г. Лисиенко, Г.Л. Хазан, А.Г. Бабенко, В.Ю. Бажин // Энергоанализ и энергоэффективность. 2006. № 7. – С. 36–39.

18.228. Пат. на изобретение № 2448759 РФ. Способ управления регистрацией рукавных пылевых фильтров с корректировкой интервала времени между импульсами / В.Г. Лисиенко, С.А. Зотов; заявл. 29.07.2008; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 4.

18.229. Пат. на изобретение № 2337747 РФ. Способ управления регистрацией рукавных пылевых фильтров / В.Г. Лисиенко, А.Г. Соколов, С.А. Зотов; заявл. 04.16.2007; опубл. 10.11. 2008.

18.230. Автоматизация технологических процессов «сухой» газоочистой установки БАЗа / В.К. Кривовяз [и др.] // Цветные металлы. 2006. № 3. – С. 68–70.

18.231. Зотов С.А. Совершенствование автоматизированной системы управления теплотехническим процессом «сухой» газоочистки электролизного цеха БАЗа / С.А. Зотов, В.Г. Лисиенко // X Юбилейная научно-практическая конференция «Алюминий Урала 2005». – Краснотурьинск: БАЗ филиал ОАО «СУАЛ», 2005. – С. 179–180.

18.232. Лисиенко В.Г. Анализ работы и усовершенствование системы автоматизированного управления сухой газоочистной установкой на примере установкой Богославского алюминиевого завода / В.Г. Лисиенко, С.А. Зотов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. № 2. – С. 180–183.

18.233. Пат. на полезную модель № 2595188 РФ. Система управления тепловым режимом в комплексе «печь Ванюкова – котел-утилизатор / В.Г. Лисиенко, Г.К. Маликов. № 201447929/02; заявл. 27.11.2014; опубл. 20.08.2016.

18.234. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков [и др.]; под ред. А.В. Ванюкова. – М.: Metallurgy, 1988. – 208 с.

18.235. Рогова Л.Н. Metallургические расчеты: учебное пособие / Л.Н. Рогова. – Норильск: Норильский индустриальный институт, 1997. – 154 с.

18.236. Анализ показателей печи Ванюкова на ОАО СУМЗ с целью стабилизации режимов плавки / А.С. Вернигора [и др.] // Цветная metallургия. 2008. № 3. – С. 24–28.

18.237. Определение статических связей многозонной нагревательной печи для алгоритма управления нагревом металла / А.Л. Гончаров, В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.П. Скуратов // Известия вузов. Черная metallургия. 1981. № 6. – С. 101–105.

18.238. A Link between Science and Application of Automatic Control / V.G. Lisienko, V.V. Volkov, A.P. Skuratov. 7th Triennial World Congress. IFAC, Helsinki, Finland, Oxford, etc. Pergamon, 1978. – P. 147–149.

18.239. Lisienko V.G. Control of Metal Heating in Conditions of Variable Throughput Flame Reheating Furnaces / V.G. Lisienko, V.V. Volkov, A.L. Goncharov. Contr. Sci. and Technol. Progress. Soc. 8th Triennial. World Congress. Int. Fed. Automatic Control, Kyoto, 24–28 August, 1981. Oxford, etc., 1982. Vol. 5. – P. 2595–2600.

18.240. А.с. 720273 СССР. Система управления режимов горения в кольцевых рекуперативных печах / Д.А. Бадалов [и др.]; заявл. 25.05.1987; опубл. 30.01.1981. Бюл. № 18.

18.241. А.с. 877290 СССР. Способ управления режимом горения в кольцевых рекуперативных печах / В.Г. Лисиенко [и др.]; заявл. 16.01.1977; опубл. 15.05. 1989. Бюл. № 40.

18.242. А.с. 1537701 СССР. Способ управления нагревом заготовок в кольцевой печи / Д.А. Бадалов [и др.]; заявл. 16.01.1987; опубл. 23.01.1990. Бюл. № 3.

18.243. Гончаров А.Л. Математическая модель пламенной печи для разработки АСУ ТП нагрева металла / А.Л. Гончаров, В.Г. Лисиенко, И.М. Резник // Черная металлургия: Изд-во Вузов. 1989. № 12. С. 121–125.

18.244. Гончаров А.Л. Использование математической модели пламенной печи для разработки АСУ ТП нагрева металла / А.Л. Гончаров, В.Г. Лисиенко, И.М. Резник // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 11. – С. 77–81.

18.245. Динамическая оптимизация процесса радиационно-конвективного нагрева движущегося металла / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.А. Константинов, Ю.В. Крюченков // Тепломассообмен ММФ: проблемные доклады. Секции 1, 2. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова, 1988. – С. 254–258.

18.246. Маликов Ю.К. Численное решение сопряженной задачи радиационно-конвективного теплообмена при моделировании нестационарных температурных процессов в нагревательных печах / Ю.К. Маликов, В.Г. Лисиенко, В.В. Волков // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. Вып. 2. № 8. 1981. – С. 16–21.

18.247. Современные подходы к методам предпроектных модельных исследований при создании промышленных печей и агрегатов XXI века / В.Г. Лисиенко [и др.]; под ред. В.Г. Лисиенко // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды III международного конгресса. – Екатеринбург: Инженерная мысль, 2008. – С. 6–24.

18.248. Конструкция и автоматизация современной камерной термической печи / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, К.А. Сурганов, А.А. Титаев // Металлург. 2008. № 12. – С. 57–60.

18.249. Лисиенко В.Г. Совершенствование системы управления и конструкций современных проходных термических печей / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев // Новые направления в области теплотехнического строительства, конструкции, технологии, материалы, энергосбережение, экология и промышленная безопасность: труды IV международного конгресса. – М.: Ассоциация печетрубостроителей России, 2013. – С. 6–11.

18.250. Пат. на изобретение РФ № 2496070. Способ регулирования газоплотности рабочего пространства электротехнологических агрегатов / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, А.А. Титаев; заявл. 19.04.2012; опубл. 20.10.2013.

18.251. Система удаленного мониторинга и управления как элемент современной АСУ металлургических переделов / В.Г. Лисиенко [и др.] // Энергоанализ и энергоэффективность. 2005. № 6. – С. 26–29.

18.252. Разработка термической печи усовершенствованной конструкции / В.Г. Лисиенко [и др.] // Сталь. 2006. № 4. – С. 63–66.

18.253. Применение концепции «черного ящика» для систем удаленного мониторинга управления / В.Г. Лисиенко [и др.] // Труды международной научно-практической конференции «Связь-Пром 2006» в рамках III Евро-Азиатского форума «Связь-Промэкспо 2006». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал-Медиа». 2006. – С. 28–31.

18.254. Конструкция и автоматизация современной камерной термической печи / В.Г. Лисиенко [и др.] // Металлург. 2008. № 12. – С. 57–60.

18.255. Системы удаленного мониторинга и управления для печных агрегатов / В.Г. Лисиенко [и др.] // Металлургическая теплотехника: история, современное состояние и будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова: труды III международной научно-практической конференции. – М.: МИСиС. 2006. – С. 414–417.

18.256. Пат. на полезную модель № 121606 РФ. Устройство адаптации регулятора температуры электрической печи сопротивления / Е.Ю. Воронцов, В.Г. Лисиенко, Н.Н. Пономарев; заяв. 18.05.2012; опубл. 27.10.2012.

18.257. Воронцов Е.Ю. Управление нагревом в электрической печи сопротивления с детерминированным адаптивным регулятором / Е.Ю. Воронцов, В.Г. Лисиенко, Н.Н. Пономарев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ 2012) с международным участием; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 194–197.

18.258. Воронцов Е.Ю. Модель расчета времени нагрева металла в электрической печи сопротивления в пакете Simulink системы Matlab / Е.Ю. Воронцов, В.Г. Лисиенко // VIII Евро-Азиатский форум, международная научно-практическая конференция по актуальным вопросам отрасли связи. «Связь-Пром 2011». – Екатеринбург: Союзпромэкспо. 2011. – С. 37–39.

18.259. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации / В. Денисенко // Современные технологии и автоматизация. 2008. № 1. – С. 86–99.

18.260. Сметана А.З. Автоматическая и автоматизированная настройка регуляторов теплоэнергетических процессов / А.З. Сметана // Теплоэнергетика. 2004. № 11. – С. 47–52.

18.261. Чесноков Ю.Н. Проектирование систем регулирования на ПК / Ю.Н. Чесноков, О.А. Гусев; под ред. В.В. Муханова. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 108 с.

18.262. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках / А.С. Невский. М.: Metallurgia. 1971. – 439 с.

18.263. Журавлев Ю.А. Радиационный теплообмен в огнетехнических установках / Ю.А. Журавлев. Красноярск: изд-во Красноярского университета, 1983. – 256 с.

18.264. Baukal Ch.E. Heat Transfer in Industrial Combustion / Ch.E. Baukal/ Bosa Raton et.al.: CRC Press, 2000. – 545 p.

18.265. Излучательные способности твердых тел / Л.Н. Латыев [и др.]; под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.

18.266. Heat Exchanger Design Handbook / Executive Ed. G.F. Hewitt. Part 1 – Part 5 // Begell House. Inc.: New York, Wallingford (U.K.), 2000. – P. 3840.

18.267. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи: учебник для вузов. В 2-х ч. / А.Д. Свенчанский. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. Изд. 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1975. – 384 с.

18.268. Советкин В.Л. Теплофизические свойства веществ / В.Л. Советкин, Л.А. Федяева. – Свердловск: УПИ, 1990. – 104 с.

18.269. Будковский А.Г. Оптимальное управление нагревом металла / А.Г. Будковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: Metallurgia, 1972. – 440 с.

18.270. Ковалевский В.Б. Оптимизация режимов работы камерной печи / В.Б. Ковалевский, В.И. Панасюк // Техническая кибернетика. 1993. № 2. – С. 23–235.

18.271. Лисиенко В.Г. Анализ режимов нагрева металла в печах камерного типа с целью уменьшения окисления / В.Г. Лисиенко, В.Б. Ковалевский, Хо Жуйтиань // Энергетика: известия вузов и энергетических объединений СНГ. 1993. № 7–8. – С. 86–89.

18.272. Ковалевский В.Б. Алгоритм минимизации интенсивности окисления при нагреве металла / В.Б. Ковалевский, В.И. Панасюк, О.Ю. Седяко // Инж.-физ. журнал. 1990. Т. 59. № 1. – С. 168–169.

18.273. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгарт [и др.]. Донецк: Вища школа, 1986. – 296 с.

18.274. Управление температурным режимом нагрева призмы с целью уменьшения обезуглероживания и топливопотребления / В.Г. Лисиенко [и др.] // Энергетика: известия вузов и энергетических объединений СНГ. 1995. № 6. – С. 116–119.

18.275. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В.И. Тимошпольский [и др.]. – М.: Наука и техника, 1992. – 158 с.

18.276. Особенности системы управления устройством термоупрочнения арматуры / К.Ю. Эйсмонт [и др.] // Сталь. 2007. № 6. – С. 40–42.

18.277. Зобнин Б.Б. Математическое моделирование появления брака в процессе изготовления топливных таблеток / Б.Б. Зобнин, В.Г. Лисиенко, А.Г. Трощенко // Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова – 15 лет: Труды международной научно-практической конференции «Топливо-металлургический комплекс»; под ред. В.Г. Лисиенко, Ю.Г.Ярошенко. – Екатеринбург: Инженерная мысль, 2007. – С. 251–257.

18.278. Гигиеническая оценка прямого газового нагрева воздуха, подаваемого в шахту / Б.А. Величковский [и др.] // Гигиена и санитария. 2011. № 4. – С. 41–45.

18.279. Экологически чистые энергосберегающие струйно-факельные системы прямого нагрева воздуха / В.Г. Лисиенко, Ю.К. Маликов, Е.М. Шлеймович, Д.Л. Лобанов // Проблемы экоинформатики: материалы 11 междуна-родного симпозиума (совместно со школой-семинаром молодых ученых). – М.: МН ТОРЭС им. А.С. Попова, 2014. – С. 63–67.

18.280. Использование технологии струйно-факельного отопления (ФСО) для низкотемпературного подогрева приточного воздуха / В.Г. Лисиенко [и др.] // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние и будущее: международная научно-практическая конференция. – Екатеринбург: УрФУ. 2004. – С. 311–319.

18.281. Развитие метода струйно-факельной интенсификации процессов нагрева металла / Г.К. Маликов [и др.] // сб. докладов Международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлур-гической теплотехники и их реализация в промышленности. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 310–315.

18.282. Дружба и сотрудничество – залог успешной творческой деятельности / Ю.Г. Ярошенко [и др.] // Там же. – 21– 34.

18.283. ПБ 03-553-03. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом // Российская газета. 21.06.2003. № 120/1(3234/1).

18.284. Использование газовых тепловых генераторов в системах обогрева воздуха подающих стволов шахты рудников /А.Е. Красноштейн, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Л.А. Третьяков // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 1 – С. 41–46.

18.285. Thurley J. Direct Fired Make-up Air Heating / J. Thurley // Industrial Process Heating. 1970. Vol. 10. No. 1. – P. 30–38.

18.286. Колядич М.Н. Гигиеническая оценка систем для нагрева приточного воздуха при сжигании природного газа / М.Н. Колядич, А.А. Гринберг, В.П. Жигалов // Гигиена и санитария. 1985. – С. 36–38.

18.287. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Дата введения 01.01.1989, дата актуализации описания 01.08.2013. – 49 с.

18.288. Мысляков А.Л. Применение систем прямого нагрева воздуха для вентиляции шахт /А.Л. Мысляков, В.В. Плотников, Д.А. Балдин // Безопасность труда в промышленности. 2013. – С. 11–12.

18.289. Развитие метода струйно-факельной интенсификации процессов нагрева металла / К.Г. Маликов [и др.] // Сталь. 2015. № 3. – С. 100–103.

18.290. Лисиенко В.Г. Выбор режимов термической обработки нефтегазопроводных труб моделированием с учетом теплопереноса / В.Г. Лисиенко, М.Р. Нурмухаметова, А.А. Титаев // Сталь. 2015. № 8. – С. 62–66.

18.291. Системы удаленного мониторинга и управления для печных агрегатов / В.Г. Лисиенко [и др.] // Металлургическая теплотехника : история, современное состояние, будущее : Труды III международной научно-практической конференции. – М.: МИСиС. 2006. – С. 414–417.

18.292. Жиленков Н. Новые технологии беспроводной передачи данных // Современные технологии автоматизации. – 2003. № 4. – С. 44–47.

18.293. Лисиенко В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах / В.Г. Лисиенко, В.В. Волков, А.Л. Гончаров. – Киев: Наукова думка, 1984. – 232 с.

18.294. Прядкин Л.Л. Автоматизация управления технологическими процессами в прокатном производстве на базе микропроцессорной техники / Л.Л. Прядкин, А.Л. Гончаров, Б.И. Бойчук. – М.: ЦНИИТЭИ Приборостроения, 1986. Вып. 7. – 51 с.

18.295. Шмачков П.Л. Экспериментальное исследование температурных полей в печи с шагающими балками СТАНК 3000 / П.Л. Шмачков, А.И. Симкин // Сталь. 1993. № 6. – С. 89–90.

18.296. Хаджийский М.Б. Текущая оценка на температурном поле в нагревателе кладенец / М.Б. Хаджийский, Е.Л. Карцева, Д. Тенчев // Металлургия. Бр. 9. 1984. – С. 6–8. (на болгарском).

18.297. Гуртовцев А.П. Комплексная автоматизация учета и контроля электроэнергии и электроносителей на промышленных предприятиях и их хозяйственных субъектах. Глава 1. Энергоучет: вчера, сегодня, завтра / А.П. Гуртовцев // Промышленная теплоэнергетика. 2000. № 4. – С. 20–27.

18.298. Никифоров Г.В. Энергосбережение на металлургических предприятиях / Г.В. Никифоров, Б.И. Заславец. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 273 с.

18.299. ГОСТ Р 51750-2001. Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказание услуг в технологических энергетических системах: общие положения. – М.: ГОССТАНДАРТ России. – С. 121–150.

18.300. Пат. на изобретение № 2315324 РФ. Система управления энергоресурсами / В.Г. Лисиенко; заявл. 06.09.2006; опубл. 20.01.2008. Бюл. № 2.

18.301. Данилов Н.И. Динамическая энергоемкость и ее анализ / Н.И. Данилов, В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков // Ресурсы, технология, экономика. 2005. № 5. – С. 43–48.

18.302. Мяков А.В. Моделирование энерготехнических процессов с помощью искусственных нейронных сетей / А.В. Мяков, В.Г. Лисиенко // научные труды V отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сб. статей. В 2 ч. Ч. 1. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – С. 202–203.

18.303. Спирин М.Н. Компьютерные системы поддержки принятия решений оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве / М.Н. Спирин, В.Г. Лисиенко // научные труды I отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сб. статей. В 2 ч. Ч. 1. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – С. 136–137.

18.304. Лисиенко В.Г. Компьютерные системы поддержки принятия решений оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве / В.Г. Лисиенко, М.Н. Спирин // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2001. – С 10–11.

18.305. Информационная система поддержки принятия решений распределения топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве / В.Г. Лисиенко, С.А. Загайнов, Л.Ю. Гилева, М.Н. Спирин // Теория и техно-логия металлургического производства: Межрегиональный сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ. 2001. – С. 19–25.

18.306. Калинин Н.С. Методы и средства измерения расхода энергоносителей и тепловой энергии: учебное пособие / Н.С. Калинин, В.Г. Лисиенко. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 89 с.

18.307. Лисиенко В.Г. Алгоритмическое и программное обеспечение учета тепловой энергии и теплоносителя / В.Г. Лисиенко, Д.Л. Анисимов // Энергетика: Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2000. № 5. – С. 58–65.

18.308. Анисимов Д.Л. Теплорегистратор «КАРАТ» / Д.Л. Анисимов, В.Г. Лисиенко, Ю.И. Пономарев // Информационные технологии и электроника: вторая Всероссийская студенческая научно-практическая конференция. – Екатеринбург УГТУ-УПИ. 1998. –С. 83–84.

18.309. Харке В. Умный дом. Объединение в сеть бытовой техники и системы коммуникаций в жилищном строительстве / В. Харке. – М.: изд-во «Техносфера», 2006. – 288 с.

18.310. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Практика энергоэкологического анализа и оценки энергоэкологической эффективности / В.Г. Лисиенко. Т. 2. Кн. 3. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – 506 с.

18.311. Лисиенко В.Г. Хрестоматия энергосбережения / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. В 2-х кн. Кн.1. – М.: Теплотехника, 2005. – 688 с.

18.312. Кузякин В.И. Информационно-измерительная техника и технология / В.И. Кузякин, В.Г. Лисиенко, В.П. Богомолов; под ред. В.П. Голубева. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 133 с.

18.313. Кузякин В.И. Основы теории и проектирования измерительных информационных технологий и систем / В.И. Кузякин, 802

В.Г. Лисиенко, Ю.В. Крюченков. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 237 с.

18.314. Бесчастнов А.А. Разработка программных комплексов контроля диагностики состояния энергетических объектов с помощью теории шкал / А.А. Бесчастнов, В.П. Богомолов, В.И. Кузякин // Программные продукты и системы. 2001. № 3. – С. 3–6.

18.315. Кузякин В.И. Концептуальное проектирование систем мониторинга состояния оборудования буровых установок / В.И. Кузякин // Известия вузов. Горный журнал. 1990. № 7. – С. 94–98.

18.316. Кузякин В.И. Компьютерные системы диагностики и мониторинга бурового и нефтегазового оборудования / В.И. Кузякин. – Екатеринбург: Свердловский ЦНТИ. – 75 с.

18.317. Сонич В.В. Источник питания высокого напряжения для установки электронно-лучевого переплава / В.В. Сонич, В.Г. Лисиенко // Научные труды V отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сб. статей. В 2-х ч. Ч. 1. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – С. 220–221.

18.318. Левин Е.С. К вопросу о закономерностях проникновения водорода через металлургические мембраны / Е.С. Левин, Ю.Н. Гук, В.Г. Лисиенко; под ред. В.Г. Лисиенко // На передовых рубежах науки и инженерного творчества: труды третьей международной научно-практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – С. 54–57.

18.319. Промышленные установки для получения особо чистого водорода из природного газа / Ю.Н. Гук, И.В. Кирнос, Е.В. Левин, В.Г. Лисиенко // Труды второй международной научно-технической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 30–31.

18.320. Гук Ю.Н. Высокотемпературные сплавы для получения особо чистого водорода / Ю.Н. Гук, Е.С. Левин // На передовых рубежах науки и инженерного творчества: труды второй международной научно-технической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – С. 38–39.

18.321. Соколовский В.И. Совершенствование мембранных аппаратов для получения особо чистого водорода / В.И. Соколовский,

В.М. Макаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1998. № 6. – С. 3–6.

18.322. Мышляев Л.П. Системы автоматизации производственного назначения. Т. 2. / Л.П. Мышляев [и др.]; под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2005. – 484 с.

18.323. Портнов-Соколов Ю.П. Краткий очерк некоторых работ по космонавтике Института проблем управления им. В.А. Трапезникова / Ю.П. Портнов-Соколов // Проблемы управления. 2003. № 3. – С. 66–73.

18.324. Супрунов С.Г. Выбор технологии получения сингаза и особенности полукоксования с последующей газификацией / С.Г. Супрунов, В.Г. Лисиенко // Инженерная поддержка инновации и модернизации: научные труды международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук РФ. – Екатеринбург: ИВТО5. 2012. – С. 40–42.

18.325. Пат. на изобретение № 2433188 РФ. Способ выплавки стали и сплавов в замкнутом энергометаллургическом цикле / В.Г. Лисиенко; заявл. 03.09.2008; опубл. 10.11.2011.

18.326. Лисиенко В.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / В.Г. Лисиенко, Н.В. Соловьева, О.Г. Трофимова; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.

18.327. Баласанов А.В. Экологически чистая тепловая электростанция на угле / А.В. Баласанов, А.Б. Усачев, Б.С. Чайкин; под ред. В.Г. Лисиенко // Печетрубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: труды II международного конгресса. – Екатеринбург: Уральский университет, Инженерная мысль, 2006. – С. 115–118.

18.328. Пареньков А.Е. Энергоэкологические функции металлургических агрегатов с жидкой ванной / А.Е. Пареньков [и др.]. Вестник УГТУ-УПИ. Научная школа УГТУ-УПИ. С творческим наследием Б.Н. Китаева в XXI век: материалы Международной конференции. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. – С. 151–158.

18.329. Мановян А.К. Технология переработки природных энергоносителей / А.К. Мановян. – М.: Химия, колосс, 2004. – 456 с.

18.330. Митронов Д.В. Введение в химию и технологию переработки угля: учебное пособие / Д.В. Митронов; под ред. Ш.А. Сюндюкова, В.А. Игошина. – Якутск: КЦ ЯГУ, 2001. – 172 с.

18.331. Супрунов С.Г. Возможности применения системы кодирования KRAFTWERK KENNZEICHEN SYSTEM (KKS) при программировании и реконструкции АСУ ТП энергоблоков для предприятий с парогазовыми установками / С.Г. Супрунов, В.Г. Лисиенко // Теплотехника и информатика в образовании, науке, производстве: сб. докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых с международным участием (ТИМ 2013). – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 259–261.

18.332. РД 153-34.1-35.144-2002. Рекомендации по применению современной универсальной системы кодирования оборудования и АСУ ТП ТЭС. – М.: Стандартинформ, 2000. – 9 с.

18.333. ГОСТ 2.710-81 (СТ СЭВ 2180, СТ СЭВ 6306-88) Межгосударственный. Единая система конструкторской документации обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.

18.335. Лисиенко В.Г. Использование плазменных, акустических и индукционных эффектов в новых технологиях обработки материалов / В.Г. Лисиенко // Инженерная поддержка инновации и модернизации: научные труды международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Вып. 2. – Екатеринбург, ИВТОБ, 2012. – С. 14–18.

18.336. Пареньков А.Е. Плазма, наноматериалы, термодинамика (моделирование, применение, управление) / А.Е. Пареньков, В.Г. Лисиенко, Л.Е. Агуреев, П.А. Дюгай; под ред. В.Г. Лисиенко. – Новоуральск: НИЯУ МИФИ НТИ, 2012. – 85 с.

18.337. Пат. на полезную модель № 112073 РФ. Плазменно-акустическая установка для получения нанодисперсных порошков / В.Г. Лисиенко, А.Е. Пареньков, Л.Е. Агуреев. № 2011120560; заяв. 09.03.2008; опубл. 10.11.2012.

18.338. Акустические и пульсирующие устройства в производстве стали / М.В. Зуев [и др.] // Новые огнеупоры. 2010. № 8. – С. 3–7.

18.339. Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях миниметаллургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов / Е.А. Коршунов [и др.] // Литейщик России. 2004. № 10. – С. 21–25.

18.340. Разработка многофункционального плавильного агрегата и технологий для микрометаллургических объектов / В.С. Третьяков [и др.] // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010. № 3. – С. 64-69.

Заключение

Данный Т. 3, глава 18, кн. 1 является авторским продолжением предыдущих изданий: Т. 1, Т. 2, Кн. 1, Кн. 2, Ч. 1 и Ч. 2, Кн. 3.

Материал данной главы посвящен актуальным вопросам управления, в том числе автоматизированного и экспертного, информатики и диагностики применительно к технологическим и энергетическим процессам, процессам нагрева и термообработки. Затронуты вопросы изготовления топливных таблеток для ТВЭЛов атомных электростанций.

Уделено внимание управлению энергоресурсами, в том числе определениям сквозной и динамической энергоемкости, оптимальному распределению энергоресурсов, проблемам освещения, вибромониторингу энергетических объектов, особо чистому водороду.

Рассмотрены также примеры внедрения указанных разработок с положительным эффектом под руководством и с участием авторов.

В Приложениях к монографии представлены разработки к лабораторным работам, проводимых авторами и коллегами (Н.Н. Пономарев, А.В. Сучков, А.А. Титаев) по читаемым магистерским учебным курсам: «Математическое моделирование и управление в энерготехнологиях», «Идентификация и диагностика в сложных саморегулирующихся системах».

Можно еще раз отметить, что в монографии представлен в значительной мере авторский подход как к теоретическим, так и практическим разработкам в области автоматизированного управления и информатики. В частности, представлены проблемы управления и диагностики в процессах нагрева и термообработки, а также рассмотрены вопросы управления энергоресурсами и энергоустановками.

В следующих гл. 19 и 20 рассматриваются вопросы управления и в других областях деятельности, включая машиностроение, авиационные и космические объекты.

Автор еще раз приносит глубокую благодарность всем коллегам, администрациям УрФУ и ИРИТ-РтФ.

Развитие управления и диагностики в технологиях и энергетике происходили и происходят бурными темпами, и еще много новых разработок и открытий принесет эта область науки и техники в будущем. Надеемся, что авторские, уже внедренные, часто «стартовые» разработки будут при этом полезны и востребованы.

ПРИЛОЖЕНИЯ

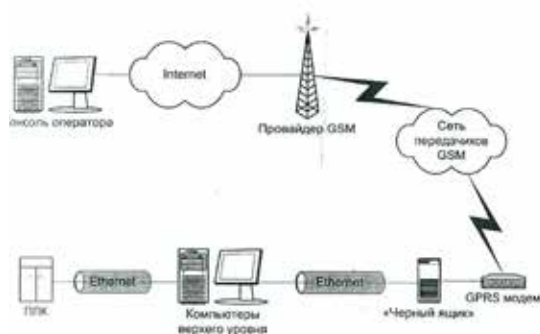
Приложение 1

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА



СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ АСУ ТП

Система рассчитана для работы в составе высокоуровневых АСУ и предназначена для сбора данных с уровней, использующих персональные компьютеры, а так же управления АСУ в целом.



ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ:

- высокоуровневые АСУ ТП агрегатов
- АСУ масштаба предприятия

ЗА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ОБРАЩАТЬСЯ:

НИИ Проблем Энергосбережения и Автоматизации (УГТУ-УПИ),
Лисиенко Владимир Георгиевич
Маликов Юрий Константинович

Тел.: (343)374-60-71, 374-76-85

e-mail: lisienko@mail.ru

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ - УПИ

INFORMATION

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ АСУ ТП

ДОСТОИНСТВА РАЗРАБОТКИ:

- компактные размеры
- высокая доступность развертывания
- наращиваемая пропускная способность
- высокая надежность и безопасность
- экономическая привлекательность: низкие
удельные капиталовложения

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

совместимость: ОС семейства Unix, Windows
средняя пропускная способность: 4 кб/с в базовом исполнении
метод туннелирования: технология OpenVPN
безопасность: OpenSSL, динамический обмен ключами
платформа системы: VIA EPIA
габариты системы: 17x17x4 см

ЗА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ ОБРАЩАТЬСЯ:

НИИ Проблем Энергосбережения и Автоматизации (УГТУ-УПИ),
Лисиенко Владимир Георгиевич
Маликов Юрий Константинович

Тел.: (343)374-60-71, 374-76-85

e-mail: lisienko@mail.ru
igor@acmecp.ustu.ru

Приложение 2

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Акт использования

Настоящий акт удостоверяет, что ОАО «Носта» (ОХМК) передана и используется компьютерная программа метода экспертных оценок компетентности мастера печи по разработкам Уральского государственного технического университета (научные руководители академик АИН РФ, профессор, д.т.н. В.Г. Лисиенко и доцент, к.т.н. В.Б. Щербатский) и по диссертационной работе Старцевой Е.Ю. «Разработка экспертных оценок на основе математической модели экспертизы новых технологических ситуаций для исследования доменного процесса с использованием пылеугольного топлива».

Заместитель производственного
директора

Бабанакон В.В.

09.10.1999 г.

Копия верна



Бабанакон

Приложение 3

РЕЦЕНЗИЯ НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

РЕЦЕНЗИЯ на магистерскую диссертацию

Студента: Юндэндорж Даваадорж, группы РИМ-220102

Тема ВКР: Разработка автоматизированной измерительной системы крупности дробления и выбор оборудования на примере ГОК «Эрдэнэт»

1. Актуальность Одним из важнейших направлений совершенствования производства горно-обогатительных предприятий является сокращение энергетических затрат и эксплуатационных расходов связанных с рудоподготовкой. Поэтому основной путь экономии, прежде всего, затрат по рудоподготовке - это оценка состава и снижение крупности дробленого продукта, поступающего в измельчение. Решение задачи определения гранулометрического состава для снижения крупности конечного продукта и повышения производительности дробильного передела во многом обеспечивается посредством оптимизации, как самим процессом дробления, так и комплексом оборудования дробильной фабрики. Таким образом, определение гранулометрического состава рудной массы является весьма востребованной задачей в области технического контроля в горнодобывающих и перерабатывающих областях промышленности, имеющей важное практическое приложение.

2. Оригинальность и глубина проработки разделов ВКР Установка слежения крупности дробления внедрена на участке дробильно – транспортного отделения и используется в производственном процессе.

3. Общая грамотность и качество оформления записки Замечаний по оформлению пояснительной записки выпускной квалификационной работы нет, работа соответствует требованиям ГОСТов.

4. Общая оценка работы Выпускная квалификационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к специалистам в области управления в технических процессах. Работа может быть допущена к защите и заслуживает отличной оценки.

Сведения о рецензенте:

Ф.И.О. Гомбжав Амарсайхан

Должность Начальник участка КХЗ ТП «Предприятия Эрдэнэт»

Место работы ГОК «Предприятия Эрдэнэт»

Подпись

Дата 11.06.2014

Приложение 4

HEAT TRANSFER SEMINAR



HEAT TRANSFER SEMINAR

Thursday, April 9, 1998
ME Room 256 3:45 PM

Heat and Mass Transfer in Direct Flame Impingement Furnaces

Professor V.G. Lisienko and Dr. G.K. Malikov
Ural State Technical University
Ekaterinburg, Russia

Direct Flame Impingement (DFI) technology is a fast developing branch of metal heating treatment for forging or piercing or reducing mills. The key feature of DFI is special gas fired burners which produce high velocity flame jets (streams) of combustion gases flowing over and around the workpiece (billet) and provide 5-10 times increased convective heat fluxes to its surface. Approximately 60% to 80% of the heat transfer is convective while the rest is radiant heat from the combustion gases and furnace refractory walls. Since there is no need to keep the refractory temperature at a high level, relatively cheap refractories may be used.

The efficiency of new DFI technology has been demonstrated at Russian tube plants: In one example, a continuous roll furnace, which heats 4" tube before reduction milling was equipped with DFI burners in 1988. It has successfully operated for almost 10 years with increased productivity from 32 up to 50 ton/h, decreased NOx pollutions by five times, and decreased gas fuel consumption by 1.5 times.

For the current investigation, the DFI process was studied in a specially designed, rapid heating experimental furnace, equipped with a multiple jets combustion system. In contrast to well recognized investigations with premixed flames, the present results were obtained for high velocities (up to 400 m/s) and firing rates. Maximum convective heat fluxes of up to 260 kW/m² were obtained with relatively 'cold' refractory wall temperatures not exceeding 1300 K. The combustion gas temperature range was 1400-1700 K. The mean flame jet flow characteristics and temperature profiles together with heat transfer rates were measured. A simple two-dimensional numerical model was developed to predict flame jet combustion and radiative as well as convective heat transfer to the load and refractories to further understanding of the process.

Everyone invited!
Refreshments served
in the faculty lounge
(Rm 254) at 3:30 pm.



Приложение 5

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯХ»

Данная лабораторная работа направлена на ознакомление студентов-магистрантов с возможностями современных компьютерных методов по определению температурных полей в объектах с распределенными параметрами. Методика данных модельных расчетов была разработана под руководством авторов и далее широко использовалась для решения многих задач применительно к объектам с распределенными параметрами [18.1; 18.4]. Эта современная отечественная методика по ряду показателей превосходит аналогичные зарубежные методы. Как написано в [18.1], методика и программное обеспечение включают три жизненных этапа: 1) определение табличных условных коэффициентов излучения; 2) определение таких же разрешающих коэффициентов (применяется метод Монте-Карло или другие усовершенствованные методики для определения обобщающих коэффициентов и метод обращения матрицы для разрешающих угловых коэффициентов); 3) определение температурных полей тепловых потоков (применяется, например, метод покоординатного спуска Ньютона-Зейделя).

Естественно, в данном студенческом лабораторном варианте при недостатке времени, задача существенно упрощена как по геометрии (параллелепипед), так и по числу применяемых зон. Программное обеспечение было усовершенствовано применительно к современным компьютерам.

А.А. Титаевым под руководством автора разработан лабораторный вариант приведения модельных зональных расчетов.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

**Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине
«Математическое моделирование и управление
в энерготехнологиях»**

*для студентов формы обучения – магистратура
направления 27.04.04 – Управление в технических системах.*

**Магистерская программа
«Управление и автоматизация в технологических
системах»**

Екатеринбург
УрФУ
2017

Цель работы: изучение методов трехмерного математического моделирования на примере расчета температурного поля замкнутой системы зональным методом.

1. Краткие теоретические сведения

В практических математических моделях высокотемпературных процессов зачастую необходимо получить поле температур и/или тепловых потоков в некоторой области (топке печи, трубопроводе с газом, паром и т. д.). В зависимости от характера модели данное поле может быть одномерным, двумерным, трехмерным, и учитывать различные механизмы теплопереноса (теплопроводность, конвекцию, излучение). Расчет трехмерного поля является, как правило, очень трудоемкой и затратной задачей, выполнить которую можно только численно с некоторой погрешностью. Существенным фактором в трехмерном случае является геометрия взаимодействующих поверхностей и объемов. В зависимости от нее определяются потоки тепла, передаваемого от одной поверхности к другой посредством излучения. Для определения доли излучения, испущенного одной поверхностью и падающей на другую поверхность, вводится понятие углового коэффициента.

1.1. Нахождение угловых коэффициентов

Рассмотрим две поверхности 1 и 2 с площадями F_i и F_k , разделенные прозрачной средой.

Пусть поток излучения площадки 1 равен Q_i . Выделим на каждой площадке небольшой элементарный участок площадью dF_i и dF_k соответственно. Пусть внутри площадки dF_i выбрана точка M_i , а внутри площадки dF_k – точка N_k .

Очевидно, что площадка F_k достигнет только часть излучения, испускаемого площадкой dF_i . Доля излучения площадки dF_i , падающая на площадку F_k называется локальным угловым коэффициентом излучения.

$$\varphi(M_i, F_k) = \frac{dQ(M_i, F_k)}{dQ(M_i)}.$$

Для определения доли излучения от всей площадки F_i достигающей площадки F_k необходимо к вышенаписанной формуле применить интегрирование по площадке F_i . Полученная формула будет описывать средний угловой коэффициент излучения. С учетом того,

что поверхность F_k также разбита на элементарные участки dF_k , получаем формулу для среднего углового коэффициента:

$$\varphi(F_i, F_k) = \frac{1}{F_i} \int \varphi(M_i, F_k) dF_i = \frac{1}{F_i} \int \int_{F_i F_k} K(M_i, N_k) dF_k dF_i,$$

где $K(M_i M_k)$ – чисто геометрическая функция, определяемая взаимным расположением точек M_i и N_k .

Вычислению средних угловых коэффициентов для некоторых геометрических конфигураций уделено большое внимание в работе [18.1]. Например, для случая двух прямоугольников конечных размеров, имеющих одну общую сторону и расположенных под углом 90° друг к другу (см. рис. П. 5.1.) имеется аналитическая формула вычисления углового коэффициента с одного прямоугольника на другой.

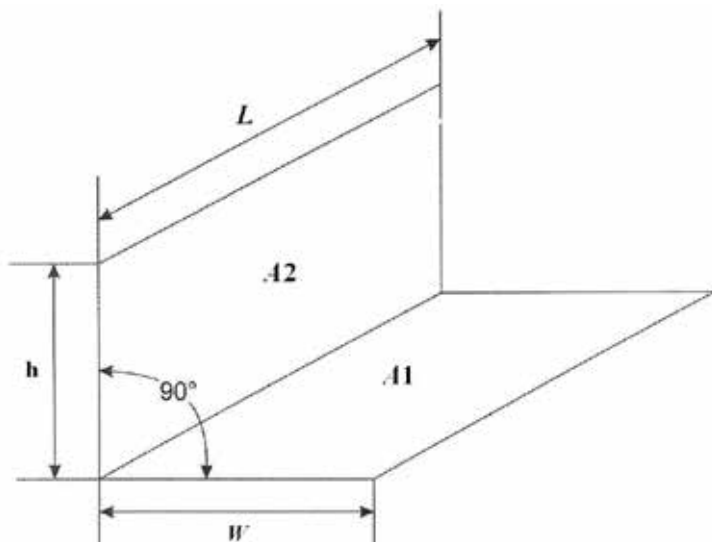


Рис. П. 5.1. К примеру вычисления углового коэффициента двух смежных прямоугольников

Введем относительные длины сторон:

$$H = \frac{h}{L}, \quad W = \frac{w}{L}.$$

Угловой коэффициент $\varphi(A_1, A_2)$ равен:

$$\varphi(A_1, A_2) = \frac{1}{\pi W} \left(W \cdot \operatorname{arctg} \frac{1}{W} + H \cdot \operatorname{arctg} \frac{1}{H} - \sqrt{H^2 + W^2} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{H^2 + W^2}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \ln \left[\frac{(1+W^2)(1+H^2)}{1+W^2+H^2} \right] \left[\frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+H^2)(W^2+H^2)} \right]^{W^2} \left[\frac{H^2(1+W^2+H^2)}{(1+H^2)(W^2+H^2)} \right]^{H^2} \right) \quad (1)$$

Из данной формулы видно, что коэффициент $\varphi(A_1, A_2)$ зависит не от абсолютных величин прямоугольников, а от двух относительных размеров (H и W).

Таким образом, можно говорить о функциональной зависимости:

$$\varphi_{12} = \varphi_{12}(H, W).$$

Зафиксировав одну из переменных (например, $W = W_0$), получим функцию от одной переменной

$$\varphi_{12W_0}(H) = \varphi(H, W).$$

Графики функции $\varphi_{12W}(H)$ для различных значений W представлены на рис. П. 5.2 (для сокращения записи индекс 12 опущен).

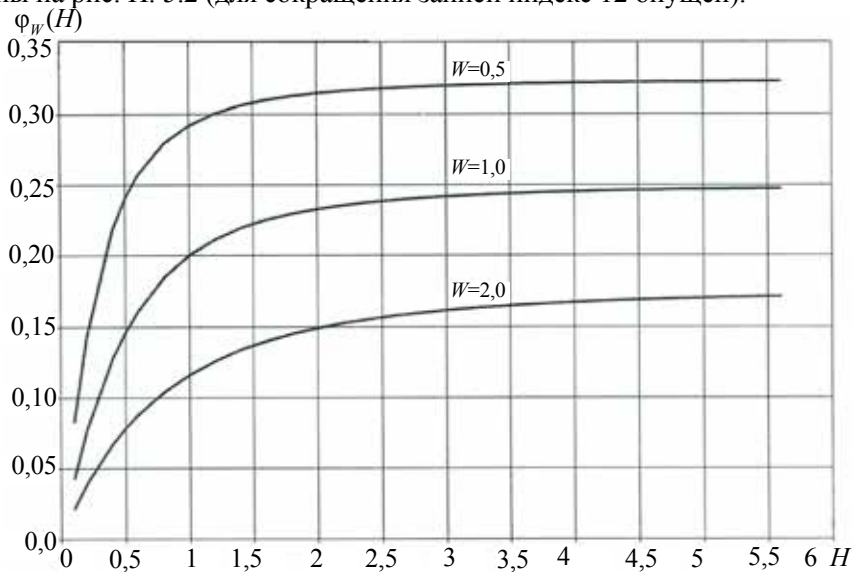


Рис. П.5.2. Графики зависимостей $\varphi_W(H)$ для различных значений параметра W

Однако следует отметить, что быстрых и эффективных методов расчета угловых коэффициентов для произвольных геометрических конфигураций не существует до сих пор.

Существенно упростить вычисление угловых коэффициентов позволяет группа численных методов с общим названием – методы Монте-Карло. Исторически данные методы восходят к 1949 г., когда Метрополис и Улам впервые опубликовали статью с его описанием [18.1].

Основа метода Монте-Карло состоит в следующем. Пусть требуется определить некоторую неизвестную величину α . Для этого выбирают некоторую случайную величину x , математическое ожидание которой равно α :

$$M(x) = \alpha.$$

После получения выборки значений данной случайной величины x_i , $i = 1 \dots n$ вычисляется выборочная средняя данной случайной величины

$$\bar{M}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

и в качестве оценки неизвестной величины α используется равенство:

$$\alpha = \bar{M}(x).$$

Точность данного соответствия определяется дополнительно из оценки выборочной дисперсии величины x и объема проведенной выборки n .

При некоторых допущениях наилучший результат дает модификация метода Монте-Карло, связанная с «имитацией» пути пучка энергии, испускаемого площадкой F_i . В этом случае весь поток излучаемой энергии разделяется на N элементарных пучков, каждый из которых излучается независимо от любого другого. Энергия, переносимая каждым пучком будет соответственно равна:

$$Q = \frac{Q_i}{N} = \frac{1}{N}.$$

Ключевым является выбор точки излучения на площадке F_i и направления излучения пучка. Данный выбор осуществляется случайным образом, учитывая диффузный характер излучения и равномерность потока по излучающей площадке. Для каждого пучка прослеживается его путь либо до пересечения с площадкой F_k либо до выхода луча из системы.

Пусть после N испытаний получено, что на площадку F_k попало S пучков. Значит, можно говорить, что с некоторой степенью точности поток, падающий на площадку F_k , равен

$$\overline{Q_k} = SQ = S \frac{1}{N} = \frac{S}{N}.$$

Таким образом, оценка среднего углового коэффициента $\varphi(F_i, F_k)$ будет равна:

$$\varphi(F_i, F_k) = \overline{Q_k} = \frac{S}{N}.$$

Математический аппарат, применяемый в данном методе, сосредоточен в решении следующих задач:

- выбор точки на излучающей поверхности по равномерному закону распределения на площади F_i ;
- выбор направления излучения пучка по равномерному закону распределения по полусфере направлений;
- определение факта пересечения испущенного пучка излучения с площадкой F_k .

Формализация алгоритма нахождения углового коэффициента двух граней.

1. Выбрать минимальное количество пучков N , позволяющее получить значение углового коэффициента с заданной точностью.

2. Количество лучей, попавших в площадку F_k $S \leftarrow 0$.

3. Цикл от 1 до N .

3.1. Выбрать случайным образом точку на поверхности грани F_i .

3.2. Выбрать случайным образом направление испускаемого пучка.

3.3. Проследить путь пучка до пересечения с плоскостью, содержащей грань F_k .

3.4. Если точка пересечения пучка с плоскостью принадлежит грани F_k , то $S = S + 1$.

3.5. Конец цикла.

4. $\varphi(F_i, F_k) = \frac{S}{N}$.

Отдельное внимание следует уделить выбору числа N – количества испускаемых пучков.

Из теории известно, что, если нет дополнительных сведений о характере значений дроби $\frac{S}{N}$, значение N можно принять равным:

$$N = \frac{t^2}{4\delta^2},$$

где δ – допустимая ошибка вычисления углового коэффициента;
 t – вспомогательная величина, получаемая из уравнения:

$$\Phi(t) = \frac{\gamma}{2},$$

где γ – выбранная допустимая надежность, с которой ошибка при получении углового коэффициента не превысит $\pm S$.

$\Phi(x)$ – функция Лапласа (определяется по таблице).

1.2. Нахождение разрешающих угловых коэффициентов

Угловые коэффициенты не позволяют описать точное распределение тепловых потоков в системе в случае, когда поверхности системы не являются абсолютно черными телами (отражают часть излучения, падающего на них). Поэтому следующим этапом нахождения температурного поля в системе является определение разрешающих угловых коэффициентов поверхностей ψ_{ik} .

Разрешающим угловым коэффициентом ψ_{ik} называется доля общего излучения с поверхности i , падающая на поверхность k с учетом всевозможных переотражений излучения в системе.

Для нахождения ψ_{ik} для каждой поверхности вводится мера ее отражающей способности в виде коэффициента отражения r_i .

Коэффициентом отражения r_i называется доля падающего излучения на поверхность i , отраженная ею.

При известных коэффициентах отражения r_i и известной матрице угловых коэффициентов значения коэффициентов решаются с помощью метода Ю. А. Суринова. А именно, решением N ($i = 1 \dots N$) систем линейных уравнений вида:

$$\psi_{ik} - \sum_{j=1}^N \psi_{ij} \cdot \Phi_{jk} \cdot r_j = \Phi_{ik}, \quad k = 1 \dots N.$$

1.3. Нахождение температурного поля в системе

По известной матрице разрешающих угловых коэффициентов можно составить матрицу коэффициентов радиационного обмена

$$R_{ij} = \begin{cases} \sigma F_i \varepsilon_i \psi_{ij}, & \text{если } i \neq j; \\ \sigma F_i \varepsilon_i (\varepsilon_j \psi_{ij} - 1), & \text{если } i = j, \end{cases}$$

где $\sigma = 5,668 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана-Больцмана;

$\varepsilon_i = 1 - r_i$ – степень черноты поверхности i (для поверхности j – аналогично);

F_i – площадь поверхности i .

Зная данные коэффициенты R_{ij} , можно записать систему уравнений, описывающих распределение тепловых потоков в системе. Сделаем допущение, что система находится в тепловом равновесии, и температура ее поверхностей неизменна во времени. Тогда система теплового баланса системы будет иметь вид:

$$\sum_{k=1}^N R_{ki} T_k^4 + Q_{\text{ист}i} = 0, \quad i = 1 \dots N.$$

В левой части каждого уравнения этой системы стоит количество теплоты, подводимое к зоне i посредством излучения от других зон (сумма) и посредством внешних источников ($Q_{\text{ист}}$). Так как система находится в тепловом равновесии, то полученная системой теплота должна быть равной нулю. Таким образом, имеем систему нелинейных уравнений относительно N неизвестных температур. Данная система решается одним из численных методов, например, методом Ньютона: методом последовательных приближений с использованием линеаризации в окрестности рассматриваемой точки.

Алгоритм нахождения решения системы $\Phi(T) = 0$ ($\Phi = \sum_{k=1}^N R_{ki} T_k^4 + Q_{\text{ист}i}$).

1. Выбираем вектор начального приближения температур T^0 .
2. Повторяем итерационно до достижения сходимости следующую последовательность действий:

2.1. Вычисляем вектор невязки ζ_0 .

$$\zeta_0 = \Phi(T^{(0)}).$$

2.2. Решаем систему линейных уравнений для получения корректирующего вектора ΔT :

$$\sum_{k=1}^N 4 \cdot R_{ki} \left(T_k^{(0)} \right)^3 \Delta T_i = -\zeta_0, \quad i = 1 \dots N.$$

2.3. Вычисляем новое приближение вектора

Полученный в процессе повторения шагов 2.1–2.3 вектор $T^{(0)}$ является искомым решением нелинейной системы уравнений.

Таким образом, для определения температурного поля системы необходимо вычислить матрицу угловых коэффициентов ϕ_{ij} , завися-

щих только от взаимного геометрического расположения поверхностей, затем, определив коэффициенты отражения каждой поверхности, вычислить матрицу разрешающих угловых коэффициентов ψ_{ij} , и, окончательно, задав количество тепла, подводимое к каждой поверхности $Q_{ист}$, решить систему нелинейных уравнений и получить вектор температур T , определяющий температуру каждой поверхности.

3. Задание на лабораторную работу

Определить температурное поле для замкнутой системы поверхностей, представляющих собой внутреннюю поверхность параллелепипеда (рис. П. 5.3), разбитую на три зоны.

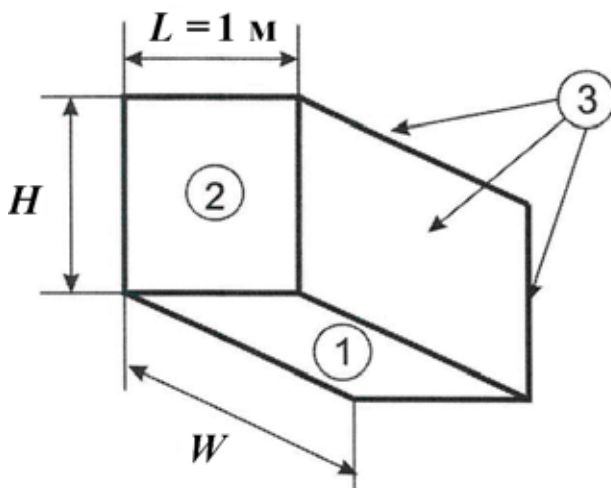


Рис. П. 5.3. Иллюстрация к заданию на лабораторную работу:

$L = 1$ м – длина основания параллелепипеда; W – ширина основания параллелепипеда; H – высота параллелепипеда; зона 1 – зона, для которой будет рассчитываться угловой коэффициент методом МК; зона 2 – зона, на которую будет рассчитываться угловой коэффициент методом МК; зона 3 – все остальные поверхности параллелепипеда

3.1. Расчет угловых коэффициентов ϕ_{ij} для случая прозрачной среды

Расчет проводится с помощью программы MC_method.exe. Необходимо задать значения параметров H , W (задаются в варианте задания), и количество испускаемых лучей N (рассчитывается). После

нажатия кнопки «Рассчитать» искомая матрица отображается в соответствующем окне вывода.

В качестве параметров для метода Монте-Карло выбраны следующие критерии:

Допустимая абсолютная погрешность результата $\delta = 0,02$ получаемая с надежностью $\gamma = 0,99$.

Необходимо построить график функции $\varphi_{12W}(H)$ для заданного значения W . В качестве данных графика использовать точную формулу (1). Вычислить угловые коэффициенты для нескольких точек графика с помощью метода МК – для шести значений параметра H ($H_{Wi} = 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$). Нанести полученные точки на график аналитического решения и определить величины ошибок.

Таблица П. 5.1

Варианты заданий

Номер варианта	Величина W
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5
6	3,0

3.2. Расчет разрешающих угловых коэффициентов ψ_{ij}

Расчет проводится с помощью программы MC_method.exe для значения $H = 1$ м. Необходимо задать значения параметров r_i для каждой зоны. Задано, что для всех зон $r_i = 0,2$. Для выполнения расчета необходимо нажать кнопку «Рассчитать», и матрица ψ_{ij} будет выведена на экран.

В качестве проверки работы программы необходимо решить одну из систем линейных уравнений методом Крамера (через определители). Например, это можно сделать для системы, в которой определяются коэффициенты ψ_{1j} :

$$\psi_{1k} - \sum_{j=1}^N \psi_{1j} \cdot \varphi_{jk} \cdot r_j = \varphi_{1k}, \quad k = 1 \dots N.$$

Необходимо сравнить полученные результаты с результатом работы программы.

3.3. Расчет температурного поля системы

Расчет выполняется с помощью программы MC_method.exe для заданных количеств теплоты, подводимой к каждой поверхности $Q_{\text{ист}}$. Заданы следующие значения:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ист1}} &= 10 \text{ кВт}; \\ Q_{\text{ист2}} &= -5 \text{ кВт}; \\ Q_{\text{ист3}} &= -5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

После нажатия кнопки «Рассчитать» будет решена система нелинейных уравнений теплового баланса, и балансные температуры зон будут выведены в соответствующие поля. Необходимо проверить полученные значения температур путем подстановки их в уравнения теплового баланса и определения ошибки вычислений.

3.4. Расчет для случая поглощающей и излучающей среды

Все предыдущие расчеты выполнялись исходя из предположения, что среда, заключенная в объеме системы не поглощает и не излучает теплового излучения (коэффициент поглощения $a = 0$). Однако практически значимыми случаями являются модели, в которых учитывается поглощение излучения средой (как, например, модели продуктов сгорания природного газа в печном пространстве).

Учет влияния среды на теплообмен в рассматриваемом параллелепипеде (рис. П. 5.3) вводится в виде ненулевого коэффициента поглощения α (альфа). Если данный параметр равен нулю, то среда не поглощает излучение, а значит, по закону Кирхгофа и не излучает его. В случае, когда данный параметр не равен нулю, часть излучения от стенок системы поглощается средой. В то же время среда сама выступает источником излучения и излучает на окружающие поверхности.

В модели учет коэффициента поглощения выполняется на этапе построения матрицы угловых коэффициентов. Значение коэффициента поглощения для различных вариантов представлены в табл. П. 5.2.

Таблица П. 5.2

Варианты заданий

Номер варианта	Величина α
1	0,10
2	0,15
3	0,20
4	0,25
5	0,30
6	0,35

Этапы нахождения разрешающих угловых коэффициентов и температур не отличаются от вышерассмотренных, за исключением того, что теперь все матрицы и системы уравнений модели имеют размерность 4 (добавляется внутри параллелепипеда зона среды, участвующая в теплообмене).

После расчета необходимо проверить полученные значения температур путем подстановки их в уравнения теплового баланса и определения ошибки вычислений.

Вариант лабораторной работы

1. Задание на лабораторную работу

Определить температурное поле для замкнутой системы поверхностей, представляющих собой внутреннюю поверхность параллелепипеда, разбитую на три зоны.

$L = 1$ м – длина основания параллелепипеда; $W = 3$ м – ширина основания параллелепипеда.

Коэффициент поглощения для варианта поглощающей среды равен 0,35. Абсолютная погрешность результата $\delta = 0,02$, получаемая с надежностью $\gamma = 0,99$.

2. Расчет угловых коэффициентов φ_{ij} для случая прозрачной среды
Определим требуемое количество лучей N :

Из теории известно, что, значение N можно принять равным:

$$N = \frac{t^2}{4\delta^2},$$

где δ – допустимая ошибка вычисления углового коэффициента;

t – вспомогательная величина, получаемая из уравнения:

$$\Phi(t) = \frac{\gamma}{2},$$

где γ – выбранная допустимая надежность, с которой ошибка при получении углового коэффициента не превысит $\pm \delta$.

$\Phi(x)$ – функция Лапласа (определяется по таблице).

Для значения $\gamma = 0,99$ значение функции $\Phi(t) = 0,495$. Отсюда по таблице находим: $t = 2,58$.

Вычисляем

$$N = \frac{(2,58)^2}{4(0,02)^2} = 4160.$$

Коэффициент поглощения устанавливаем равным нулю. Таблица полученных в ходе вычислений значений:

$H, \text{ м}$	$\varphi_{12(\text{теор})}(H)$	$\varphi_{12(\text{МК})}(H)$	Ошибка $\delta = \varphi_{12(\text{теор})}(H) - \varphi_{12(\text{МК})}(H) $
0,5	0,0533	0,0492	0,0041
1	0,0806	0,0817	0,0011
2	0,1078	0,1107	0,0029
3	0,1202	0,1221	0,0019
4	0,1266	0,1312	0,0046
5	0,1302	0,1333	0,0031

$\varphi_{12}(H)$

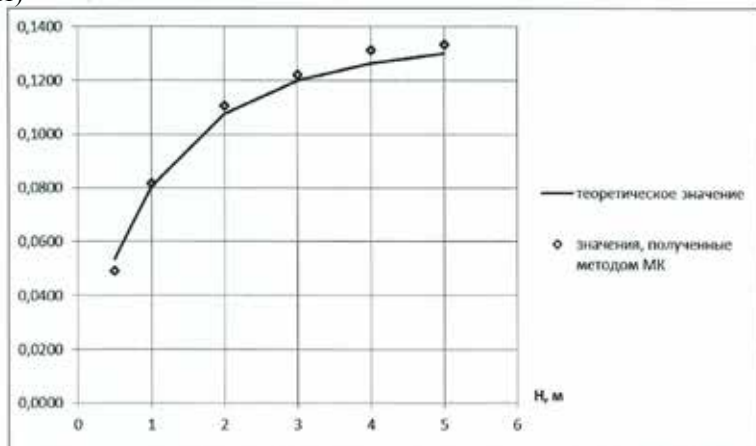


Рис. П. 5.4. График зависимости $\varphi_{12}(H)$

Видно, что все ошибки вычислений укладываются в допустимую погрешность 0,02 (см. рис. П. 5.1).

3. Расчет разрешающих угловых коэффициентов

Расчет проводится с помощью программы MC_method.exe для значения $H = 1 \text{ м}$. Принимаем, что значения коэффициента отражения для всех зон $r_i = 0,2$.

Исходная матрица угловых коэффициентов имеет вид:

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0 & 0,0792 & 0,9208 \\ 0,2365 & 0 & 0,7635 \\ 0,2761 & 0,0756 & 0,6483 \end{pmatrix}.$$

После работы программы вычисленная матрица разрешающих угловых коэффициентов равна:

$$\Psi = \begin{pmatrix} 0,0647 & 0,0967 & 1,0887 \\ 0,2894 & 0,0188 & 0,9418 \\ 0,3263 & 0,0933 & 0,8304 \end{pmatrix}.$$

Проверяем вычисление первой строки данной матрицы, решая систему линейных уравнений методом Крамера:

$$\Psi_{1k} - \sum_{j=1}^N \Psi_{1j} \cdot \Phi_{jk} \cdot r_j = \Phi_{1k}, \quad k = 1 \dots N.$$

Система имеет вид:

$$\begin{cases} \Psi_{11} - \Psi_{11}\Phi_{11}r_1 - \Psi_{12}\Phi_{21}r_2 - \Psi_{13}\Phi_{31}r_3 = \Phi_{11} \\ \Psi_{12} - \Psi_{11}\Phi_{12}r_1 - \Psi_{12}\Phi_{22}r_2 - \Psi_{13}\Phi_{32}r_3 = \Phi_{12} \\ \Psi_{13} - \Psi_{11}\Phi_{13}r_1 - \Psi_{12}\Phi_{23}r_2 - \Psi_{13}\Phi_{33}r_3 = \Phi_{13} \end{cases}$$

Переходим к числовым значениям:

$$\begin{cases} \Psi_{11} - 0,0473\Psi_{12} - 0,05522\Psi_{13} = 0 \\ -0,01584\Psi_{11} + \Psi_{12} - 0,01512\Psi_{13} = 0,0792 \\ -0,18416\Psi_{11} - 0,1527\Psi_{12} + 0,87034\Psi_{13} = 0,9208 \end{cases}.$$

Основной определитель системы равен:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -0,0473 & -0,05522 \\ -0,01584 & 1 & -0,01866 \\ -0,18416 & -0,1527 & 0,87034 \end{vmatrix} = 0,856945.$$

Дополнительные определители равны:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & -0,0473 & -0,05522 \\ -0,0967 & 1 & -0,01866 \\ -0,9208 & -0,1527 & 0,87034 \end{vmatrix} = 0,055433;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -0,05522 \\ -0,01584 & 0,0967 & -0,01866 \\ -0,18416 & 0,9208 & 0,87034 \end{vmatrix} = 0,082853;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & -0,0473 & 0 \\ -0,01584 & 1 & 0,09866 \\ -0,18416 & -0,1527 & 0,9208 \end{vmatrix} = 0,932894.$$

Искомые коэффициенты равны:

$$\psi_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{0,055433}{0,856945} = 0,0647;$$

$$\psi_{12} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{0,0082853}{0,856945} = 0,0967;$$

$$\psi_{13} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{0,932894}{0,856945} = 1,0887.$$

Сравнивая полученные значения с первой строкой матрицы разрешающих угловых коэффициентов, убеждаемся в их равенстве.

4. Расчет температурного поля системы

Для выполнения расчета зональным методом по известной матрице разрешающих угловых коэффициентов была сгенерирована матрица коэффициентов радиационного обмена R_{ij} , по правилу:

$$R_{ij} = \begin{cases} \sigma F_i \varepsilon_i \psi_{ij}, & \text{если } i \neq j; \\ \sigma F_i \varepsilon_i (\varepsilon_j \psi_{ij} - 1), & \text{если } i = j, \end{cases}$$

где $\sigma = 5,668 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана-Больцмана;

$\varepsilon_i = 1 - r_i$ – степень черноты поверхности i (для поверхности j – аналогично);

F_i – площадь поверхности i .

Для выбранных зон имеем площади поверхностей:

$$F_1 = 1 \cdot W = 1 \cdot 3 = 3 \text{ м}^2;$$

$$F_2 = 1 \cdot H = 1 \cdot 1 = 1 \text{ м}^2;$$

$$F_3 = 2 \cdot H \cdot W + 1 \cdot W + 1 \cdot H = 2 \cdot 1 \cdot 3 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 1 = 10 \text{ м}^2;$$

$$\varepsilon_i = 1 - r_i = 1 - 0,2 = 0,8, \quad i = 1 \dots 3.$$

Получена матрица радиационных коэффициентов:

$$R = \begin{pmatrix} -128,99 & 10,52 & 118,48 \\ 10,50 & -44,66 & 34,16 \\ 118,37 & 33,84 & -152,21 \end{pmatrix}.$$

Система балансовых уравнений имеет вид:

$$\sum_{k=1}^3 R_{ki} T_k^4 + Q_{ист i} = 0, \quad i = 1 \dots 3.$$

Расчет температурного поля выполняется с помощью программы МС_method.exe для заданных количеств тепла, подводимого к каждой поверхности $Q_{ист i}$. Принимаются следующие значения $Q_{ист i}$:

$$Q_{ист 1} = 10 \text{ кВт};$$

$$Q_{ист 2} = -5 \text{ кВт};$$

$$Q_{ист 3} = -5 \text{ кВт}.$$

Результатом работы программы является вектор температур, удовлетворяющих нелинейной системе уравнений баланса тепла:

$$T_1 = 838 \text{ К};$$

$$T_2 = 755 \text{ К};$$

$$T_3 = 807 \text{ К}.$$

Проверим правильность найденного решения, подставив значения температур в первое уравнение системы:

$$\sum_{k=1}^3 R_{k1} T_k^4 + Q_{ист1} = 0.$$

$$R_{11} T_1^4 + R_{21} T_2^4 + R_{31} T_3^4 + Q_{ист1} = 0.$$

$$-128,99 \cdot 0,838^4 + 10,50 \cdot 0,755^4 + 118,38 \cdot 0,807^4 + 10 = 0.$$

$$0,0045 = 0.$$

Видно, что при использовании алгоритма численного нахождения решения нелинейной системы допущена сравнительно небольшая погрешность 0,0045 кВт.

5. Расчет для случая поглощающей и излучающей среды

Для выполнения расчета задаем значение коэффициента поглощения, равная 0,35, и проводим расчет.

Получена матрица радиационных коэффициентов:

$$R = \begin{pmatrix} -132,3 & 7,8 & 84,8 & 39,7 \\ 7,6 & -45,0 & 24,6 & 12,7 \\ 84,5 & 23,5 & -240,3 & 132,3 \\ 38,7 & 12,9 & 124,0 & -175,6 \end{pmatrix}.$$

Система балансовых уравнений имеет вид:

$$\sum_{k=1}^4 R_{ki} T_k^4 + Q_{ист i} = 0, i = 1 \dots 4.$$

Расчет температурного поля выполняется с помощью программы MS_method.exe для заданных количеств тепла, подводимого к каждой поверхности $Q_{ист i}$. Принимаются следующие значения $Q_{ист i}$:

$$\begin{aligned} Q_{ист 1} &= 10 \text{ кВт}; \\ Q_{ист 2} &= -5 \text{ кВт}; \\ Q_{ист 3} &= -5 \text{ кВт}; \\ Q_{ист 4} &= 0 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

Результатом работы программы является вектор температур, удовлетворяющих нелинейной системе уравнений баланса тепла:

$$\begin{aligned} T_1 &= 843 \text{ К}; \\ T_2 &= 760 \text{ К}; \\ T_3 &= 810 \text{ К}; \\ T_4 &= 825 \text{ К}. \end{aligned}$$

Проверим правильность найденного решения, подставив значения температур в первое уравнение системы:

$$\sum_{k=1}^4 R_{k1} T_k^4 + Q_{ист1} = 0,$$

$$R_{11} T_1^4 + R_{21} T_2^4 + R_{31} T_3^4 + R_{41} T_4^4 + Q_{ист1} = 0,$$

$$\begin{aligned} -132,3 \cdot 0,843^4 + 7,6 \cdot 0,760^4 + 84,5 \cdot 0,810^4 + 38,7 \cdot 0,825^4 + 10 &= 0, \\ 0,023 &= 0. \end{aligned}$$

Видно, что при использовании алгоритма численного нахождения решения нелинейной системы допущена небольшая погрешность 0,023 кВт.

6. Выводы

В данной лабораторной работе было проведено трехмерное моделирование тепловых потоков в замкнутой излучающей системе с использованием зонального метода расчета. Угловые коэффициенты были найдены методом Монте-Карло, разрешающие угловые коэффициенты были найдены через решение систем линейных уравнений, температуры зон были найдены численным решением уравнений баланса теплоты.

Приложение 6

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В СЛОЖНЫХ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ»

Экспертная система управления тепловым режимом доменной печи («Советчик мастера доменной печи»)*

1. Доменная печь как объект управления

Доменная печь в качестве объекта управления характеризуется следующим образом:

- огромная мощность и производительность агрегата, его размеры и численность персонала, важнейшее место в структуре металлургического предприятия;
- множество различных входящих и выходящих веществ, в числе которых есть твердые, газообразные и жидкие;
- сложная динамика противонаправленного движения материалов и газов внутри печи;
- две основные зоны, через которые осуществляется подача веществ и их выпуск – колошник (верхняя часть) и горн (нижняя);
- значительная инерционность процессов; переходные процессы идут часами;
- большое количество протекающих в объеме печи взаимодействий и химических реакций;
- одновременное протекание как дискретных, так и непрерывных процессов;
- несколько основных целей, которые преследуются в процессе управления;
- невозможность полной автоматизации и наличие человеческого фактора при принятии решений;
- большое количество управляющих переменных и необходимость регулирования сразу нескольких из них в реальных ситуациях;
- возможность достижения одинаковых выходных показателей при разных наборах значений управляющих параметров.

* Лабораторная работа проводится на компьютерах с использованием программного обеспечения, разработанного А.В. Сучковым под руководством В. Г. Лисиенко.

Наряду с совершенствованием систем автоматизации перспективным направлением является создание средств поддержки принятия решений, которые способны формировать рекомендации по значениям управляющих параметров. Основой такой системы должна быть подходящая математическая модель процесса.

2. Работа с моделью доменной печи, входящей в программный комплекс «Советчик мастера доменной печи»

2.1. Цели работы:

Целями работы являются:

- получение практических навыков работы с моделью многомерного объекта на примере доменной печи;
- расчет оптимального набора параметров управления доменной печью с помощью модели в условиях существующих ограничений.

2.2. Работа с программой-советчик для расчетов по модели

2.2.1. Настройки программы-советчик

Входные данные хранятся в файле настроек модели формата MS Excel. Результаты расчетов открываются в файле того же формата, при сохранении файла необходимо ввести его имя. Для выполнения расчета необходимо запустить программу (Советчик.exe), открыть окно настроек нажав кнопку «Настройки» в нижней части основного окна, в блоке «Режим» окна настроек задать «Однократный расчет модели», а в блоке «Файл данных» выбрать файл с исходными данными («Печь1.xls», «Печь2.xls», и т. д. в зависимости от варианта). После этого для получения результатов расчетов с помощью модели в соответствии с файлом настроек модели достаточно нажать кнопку «Начать» основного окна.

2.2.2. Настраиваемые параметры модели

Для определения показателей плавки с помощью модели она должна быть настроена на конкретные условия работы доменной печи. Для этого в файле с исходными данными необходимо скорректировать:

- параметры шихты;
- параметры чугуна и шлака;
- параметры дутья и топлива, подаваемого с дутьем;
- условия равновесия.

Последняя группа содержит коэффициенты адаптации модели (в первую очередь это степени использования газов - константы равно-

весия K_{co} и K_{H_2}), они должны быть подобраны так, чтобы фактические и расчетные показатели плавки совпадали. Ниже приведен пример настройки коэффициента адаптации.

2.2.3. Пример настройки значения константы равновесия K_{co}

Рассмотрим настройку значения K_{co} (задается в файле настроек модели во 2 столбце, 65 строке) на условия конкретной доменной печи. Для правильного задания данной величины необходимо достижение совпадения расчетной и фактической величины расхода кокса K .

Дано:

– фактическое значение K при базовом режиме равно 399 кг/т чугуна;

– расчетное значение K равно 408 кг/т чугуна;

– значение K_{co} для расчетов равно 0,65.

Поиск необходимого значения.

Необходимо в файле настроек модели задать несколько меньшее значение K_{co} , например, 0,60. После этого запустить расчет в программе-советчике. В результатах расчета присутствует величина расхода кокса. Если она не совпадает с условием задачи, необходимо снова изменить значение K_{co} для достижения совпадения. При этом нужно учитывать, что большему расходу кокса соответствуют меньшие значения константы равновесия. В данном случае совпадение достигается при $K_{\text{co}} = 0,61$.

2.2.4. Расположение параметров в файле настроек модели

В процессе выполнения работы необходимо изменять значения параметров адаптации и управляющих переменных в файле исходных настроек модели, ниже приведены ячейки, в которых они находятся:

- константа равновесия K_{co} – 2 столбец, 65 строка;
- расход природного газа, м³/т чугуна: 1 столбец, 6 строка;
- расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна: 1 столбец, 18 строка;
- основность шлака: 2 столбец, 46 строка;
- температура дутья, °C: 1 столбец, 54 строка;
- кислород в дутье, %: 2 столбец, 54 строка;
- влажность дутья, %: 3 столбец, 54 строка;
- содержание железа в шихте, %: 1 столбец, 60 строка;
- состав чугуна, %: 42 строка.

Таблица П. 6.1

2.3. Варианты заданий

№ печи	Условия исходного состояния	Исходный расход кокса, кг/т чугуна	Требуемые значения	Ограничения управляющих параметров
1	2	3	4	5
Вариант 1. Минимизация выхода шлака и расхода кокса				
1	$P = 390$; $G_{\text{ПГ}} = 67$; $\text{Fe}_{\text{ш}} = 58$	560	$S < 310$; $1900 < T_{\text{фо}} < 2100$; минимальный К	$0,9 < L < 1,3$; $900 < T_{\text{д}} < 950$; $60 < G_{\text{ПГ}} < \text{ПО}$. Рассмотреть две ситуации: а) без дополнительного обогащения дутья кислородом; б) $\text{O}_2 = 23$
Вариант 2. Сравнение эффективности ПГ и УП при разных уровнях кислорода				
2	$P = 2500$; $\Gamma_{\text{д}} = 1000$; $\text{H}_2\text{O} = 25$	519	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; минимальный К	$G_{\text{УП}}$ либо $G_{\text{УП}}$ в допустимых пределах (при этом ПГ и УП одновременно подаваться не могут). Рассмотреть две ситуации: а) $\text{O}_2 = 22,6$; б) $\text{O}_2 = 24$
Вариант 3. Замена природного газа пылеугольным топливом				
3	$\text{O}_2 = 24$; $\text{H}_2\text{O} = 9$.	404	$1900 < T_{\text{фо}} < 2000$; уровень К как в исходном состоянии	H_2O , $T_{\text{д}}$ и $G_{\text{УП}}$ в допустимых пределах; $G_{\text{ПГ}} = 0$. Рассмотреть две ситуации: а) $T_{\text{д}} < 950$; б) $T_{\text{д}} > 1050$
Вариант 4. Переход на ванадиевый чугун				
4	нет	500	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; состав чугуна: $\text{Fe} - 94$, $\text{Si} - 0,3$, $\text{Ti} - 0,3$, $\text{V} - 0,5$; минимальный К.	$G_{\text{ПГ}}$, $T_{\text{д}}$, H_2O в допустимых пределах. Рассмотреть две ситуации: а) $\text{H}_2\text{O} < 10$; б) $G_{\text{ПГ}} < 90$

Окончание табл. П. 6.1

1	2	3	4	5
Вариант 5. Переход на литейный чугун				
1	$P = 410$	570	$2200 < T_{\text{фо}} < 2300$; состав чугуна: Si – 1,8, Ti – 0, V – 0; минимальный K	Рассмотреть две ситуации: а) $G_{\text{пг}}$, $T_{\text{д}}$, H_2O в допустимых пределах; б) то же, но с возможностью варьирования O_2 ($\text{O}_2 < 25$)
Вариант 6. Минимизация расхода кокса при снижении температуры дутья				
2	$P = 2600$	528	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; минимальный K	$T_{\text{д}} = 1000$; $\text{H}_2\text{O} > 7$. Рассмотреть две ситуации: а) $G_{\text{пг}}$ и O_2 в допустимых пределах; б) то же, но $G_{\text{пг}} < 80$
Обозначения: K – удельный расход кокса, кг/т чугуна; P – производительность, т чугуна/сутки; S – удельный выход шлака, кг/т чугуна; $T_{\text{фо}}$ – температура фурменного очага, °C; $\text{Fe}_{\text{ш}}$ – содержание железа в шихте, %; L – основность шлака; Si – содержание кремния в чугуне, %; $T_{\text{д}}$ – температура дутья, °C; H_2O – содержание влаги в дутье, г/м; O_2 – содержание кислорода в дутье, %; $G_{\text{пг}}$ – расход природного газа, м³/т чугуна; $G_{\text{уп}}$ – расход угольной пыли, кг/т чугуна				

2.4. Порядок выполнения работы

1. Задать в настройках программы-советчик файл для доменной печи в соответствии с вариантом.

2. Изменить настройки в файле в соответствии с дополнительными условиями исходного состояния.

Примечание: для нахождения нужных величин в файле можно воспользоваться п. 2.2.4 «Расположение параметров в файле настроек модели».

3. Подобрать константу равновесия $K_{\text{со}}$ для совпадения расчетной величины расхода кокса (отображается в результатах расчета модели) с заданной (указана в столбце «Исходный расход кокса») в соответствии со своим вариантом. Точность задания $K_{\text{со}}$ – два знака после запятой.

Примечание 1: предварительно можно ознакомиться с п. 2.2.3 «Пример настройки значения константы равновесия K_{co} ».

Примечание 2: после подбора необходимо сохранить файл настроек модели и соответствующий файл с результатами расчета для отчета.

4. а) Обеспечить требуемые значения показателей в соответствии с условием задачи (столбец «Требуемые значения») путем варьирования и подбора значений указанных управляющих параметров (столбец «Ограничения управляющих параметров», ситуация а).

б) Аналогичным образом выполнить задание для ситуации б.

Примечание 1: величины, которые не упомянуты в условии, должны оставаться неизменными.

Примечание 2: если в требуемых значениях присутствует состав чугуна, он задается однократно до изменения управляющих параметров и затем не меняется.

Примечание 3: помимо указанных пределов необходимо учитывать допустимые пределы изменения управляющих параметров, имеющиеся в теоретическом материале.

Примечание 4: после решения задачи необходимо сохранить файлы с настройками модели и соответствующие файлы с результатами для отчета.

Сделать выводы по влиянию каждой из рассмотренных входных величин модели на выходные. Какой вид зависимости наблюдается (прямая, обратная), насколько выражена эта зависимость.

Сделать выводы по различию двух рассмотренных ситуаций – а и б с точки зрения возможностей воздействия на объект при разных ограничениях на управляющие параметры.

2.5. Содержание отчета

Фамилия, имя студента, группа. Название и цель работы.

Задание в соответствии со своим вариантом.

Таблица из файла настроек модели после нахождения коэффициента адаптации K_{co} . Таблица из файла с результатами расчетов (до тепловых балансов). Выделить величины константы равновесия и расхода кокса для наглядности.

Таблица из файла с настройками модели, которые позволяют решить задачу для ситуации а. Таблица с соответствующими результатами расчетов (до тепловых балансов) для ситуации а. Выделить управляющие параметры, которые менялись и выходные величины, для которых заданы требования.

Таблица из файла с настройками модели, которые позволяют решить задачу для ситуации б. Таблица с соответствующими результатами расчетов (до тепловых балансов) для ситуации б. Выделить управляющие параметры, которые менялись, и выходные величины, для которых заданы требования.

Выводы по влиянию каждой рассмотренной входной величины на каждую выходную. Виды зависимостей и их выраженность.

Выводы по различию ситуаций а и б с точки зрения возможностей воздействия на объект при разных ограничениях на управляющие параметры.

3. Использование системы поддержки принятия решений для доменной печи

3.1. Цель работы

Получение навыков работы с системой поддержки принятия решений на основе модели многомерного технологического объекта.

3.2. Основные сведения о программе

«Советчик мастера доменной печи»

3.2.1. Назначение и основное окно программы

Программа «Советчик мастера доменной печи» представляет собой систему поддержки принятия решений (СППР). Основное окно программы показано на рис. П. 6.1.

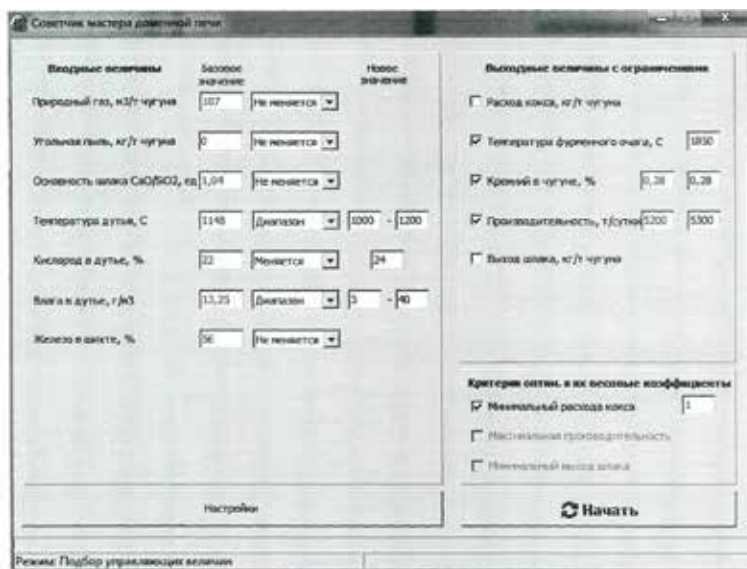


Рис. П. 6.1. Основное окно программы

Задачей СППР является определение таких значений управляющих переменных доменного процесса, которые обеспечивают необходимые значения выходных переменных.

3.2.5. Получение результатов

Когда заданы все необходимые условия для расчетов (базовые величины, новые условия для входных и выходных величин) нужно нажать кнопку «Начать». Будет произведен расчет, при этом, если задано много интервалов для управляющих величин, он может длиться несколько минут.

Результат работы программы – это таблица, строкам которой соответствуют отдельные рекомендации в виде наборов управляющих параметров. В левой части находятся управляющие величины, в правой – выходные величины.

3.2.6. Расположение параметров в файле настроек модели

Ниже приведены ячейки, в которых находятся значения управляющих переменных в файле настроек модели:

- константа равновесия K_{∞} : 2 столбец, 65 строка;
- расход природного газа, м³/т чугуна: 1 столбец, 6 строка;
- расход пылеугольного топлива, кг/т чугуна: 1 столбец, 18 строка;
- основность шлака: 2 столбец, 46 строка;
- температура дутья, °С: 1 столбец, 54 строка;
- кислород в дутье, %: 2 столбец, 54 строка;
- влажность дутья, %: 3 столбец, 54 строка;
- содержание железа в шихте, %: 1 столбец, 60 строка;
- состав чугуна, %: 42 строка;
- производительность печи, т/сутки: 3 столбец, 69 строка;
- зола кокса, %: 2 столбец, 34 строка.

3.3. Варианты заданий

Работа для каждого варианта предполагает решение двух задач. Ниже приведены задачи для каждого варианта.

Таблица П. 6.2

Варианты и задачи

№ варианта	№ первой задачи	№ второй задачи
1	1	7
2	2	8
3	3	9
4	4	9
5	5	7
6	6	8

Задачи приведены ниже (табл. П. 6.3). Как можно видеть, первая задача аналогична заданию из лабораторной работы № 1.

Таблица П. 6.3

Задачи

№ печи	Условия исходного состояния	Исходный расход кокса, кг/т чугуна	Необходимо обеспечить	Управляющие параметры и их ограничения
1	2	3	4	5
Задача 1. Минимизация выхода шлака и расхода кокса				
1	$P = 390$; $ПГ = 67$; $Fe_{и} = 58$	$K = 560$	$S < 310$; $1900 < T_{фо} < 2100$; минимальный K	$L > 0,9$; $T_d < 950$; Рассмотреть два варианта: а) без обогащения дутья кислородом; б) $O_2 = 23$.
Задача 2. Сравнение эффективности ПГ и УП при разных уровнях кислорода				
2	$P = 2500$; $T_d = 1000$; $H_2O = 25$	$K = 519$	$1800 < T_{фо} < 1900$; Минимальный K	$G_{ПГ}$ либо $G_{УП}$ в допустимых пределах (при этом ПГ и УП одновременно подаваться не могут). Рассмотреть два варианта: а) $O_2 = 22,6$; б) $O_2 = 24$
Задача 3. Замена природного газа пылеугольным топливом				
3	$O_2 = 24$; $H_2O = 9$	$K = 404$	$1900 < T_{фо} < 2000$; уровень K как в исходном состоянии	H_2O , T_d и $G_{УП}$ в допустимых пределах; $G_{ПГ} = 0$. Рассмотреть два варианта: а) $T_d < 950$; б) $T_d \geq 1050$
Задача 4. Переход на ванадиевый чугун				
4		$K = 500$	$1800 < T_{фо} < 1900$; состав чугуна: $Fe - 94$, $Si - 0,3$, $Ti - 0,3$, $V - 0,5$; минимальный K	$G_{ПГ}$, T_d , H_2O в допустимых пределах. Рассмотреть два варианта: а) $H_2O \leq 10$; б) $G_{ПГ} \leq 90$

Продолжение табл. П. 6.3				
1	2	3	4	5
Задача 5. Переход на литейный чугун				
1	$P = 410$	$K = 570$	$2200 < T_{\text{фо}} < 2300$; состав чугуна: Si – 1,8, Ti – O, V – 0; минимальный K	Рассмотреть два варианта: а) $G_{\text{пг}}, T_{\text{д}}, \text{H}_2\text{O}$, в допустимых пределах; б) то же, но с возможностью варьирования O_2 ($\text{O}_2 < 25$)
Задача 6. Минимизация расхода кокса при снижении температуры дутья				
2	$P = 2600$	$K = 528$	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; минимальный K	$T_{\text{д}} = 1000$; $\text{H}_2\text{O} \geq 7$. Рассмотреть два варианта: а) $G_{\text{пг}}$ и O_2 в допустимых пределах; б) то же, но $G_{\text{пг}} < 80$
Задача 7. Восстановление производительности при снижении содержания железа в шихте				
3	$P = 5200$	$K = 417$	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; $P = 5300$; минимальный K	$\text{Fe}_{\text{ш}} = 56$; $\text{O}_2 = 24$; $G_{\text{пг}} \leq 80$; H_2O в допустимых пределах. Воспользоваться полученными рекомендациями по изменению а) $T_{\text{д}}$; б) O_2
Задача 8. Компенсация повышения содержания золы в коксе				
4	$Z = 13,5$ $P = 520$	$K = 522$	$2000 < T_{\text{фо}} < 2100$; $P = 530$; Si = 0,5; $K = 500$	$T_{\text{д}}$ и O_2 в допустимых пределах. Воспользоваться полученными рекомендациями по изменению: а) $G_{\text{пг}}$; б) L
Задача 9. Ограничения на выход шлака				
1		$K = 589$	$1800 < T_{\text{фо}} < 1900$; $S = 320$; минимальный K.	$\text{Fe}_{\text{ш}}, L$ в допустимых пределах. Воспользоваться полученными рекомендациями по изменению а) $G_{\text{пг}}$; б) H_2O

Окончание табл. П. 6.3

Обозначения:	K – удельный расход кокса, кг/т чугуна;
	P – производительность, т чугуна/сутки;
	S – удельный выход шлака, кг/т чугуна;
	$T_{\text{фо}}$ – температура фурменного очага, °С;
	$\text{Fe}_{\text{ш}}$ – содержание железа в шихте, %;
	L – основность шлака;
	Si – содержание кремния в чугуне, %;
	$T_{\text{д}}$ – температура дутья, °С;
	H_2O – содержание влаги в дутье, г/м ³ ;
	O_2 – содержание кислорода в дутье, %;
	$G_{\text{пг}}$ – расход природного газа, м ³ /т чугуна;
	$G_{\text{уп}}$ – расход угольной пыли, кг/т чугуна;
	Z – содержание золы в коксе, %

3.4. Порядок выполнения работы

1. Открыть файл настроек модели для печи, указанной в решаемой задаче. Внести данные из столбца «Условия исходного состояния», если они присутствуют.

Примечание: для нахождения нужных величин в файле можно воспользоваться п. «Расположение параметров в файле настроек модели».

2. Задать в настройках программы-советчика отредактированный файл, выбрать режим «Однократный расчет модели».

3. Подобрать константу равновесия K_{co} для совпадения расчетной величины расхода кокса (отображается в результатах расчета модели) с заданной (указана в столбце «Исходный расход кокса») в соответствии со своим вариантом. Точность задания K_{co} – два знака после запятой.

4. Задать в файле настроек модели состав чугуна из раздела «Необходимо обеспечить» (только для задач 4 и 5).

5. Установить режим работы «Подбор управляющих величин» в настройках программы. Задать ограничения для входных величин и требуемые значения для выходных в главном окне для ситуации а.

Примечание 1: нужно отметить выходные величины «Кремний в чугуне» и «Производительность» галочками, требуемые их значения должны быть равны базовым, если в условии задачи не указано иного.

Примечание 2: величины, которые не упомянуты в условии, должны оставаться неизменными.

Для перехода к главному окну советчика необходимо в настройках программы (кнопка «Настройки» главного окна) выбрать режим «Подбор управляющих величин».

Базовые значения

Для всех входных величин (блок в левой части основного окна) и двух выходных величин (блок в правой части основного окна) должны быть заданы базовые значения. Это фактические значения параметров на данный момент. Базовые значения параметров выделены красным цветом.

При выборе другого файла настроек модели базовые значения обновляются в соответствии с этим файлом.

Задание ограничений на выходные величины

Задание ограничения на выходную величину происходит при помощи задания целевого значения (в главном окне) и допустимого отклонения (в окне настроек).

Задание целевого значения

Целевое значение задается в правой части основного окна (в блоке «Выходные величины с ограничениями»). Для задания целевого значения для одной из приведенных величин необходимо отметить ее галочкой и задать число (рис. П. 6.2).

Основное окно	
Выходные величины с ограничениями	
<input checked="" type="checkbox"/> Расход кокса, кг/т чугуна	500
<input checked="" type="checkbox"/> Температура фурменного очага, С	2250
<input checked="" type="checkbox"/> Кремний в чугуне, %	1,8
<input checked="" type="checkbox"/> Производительность, т/сутки	410
<input type="checkbox"/> Выход шлака, кг/т чугуна	

Рис. П. 6.2. Задание целевого значения расхода кокса

Задание допустимого отклонения

Допустимое отклонение задается в окне настроек программы. Так, если расход кокса должен быть 500 ± 1 кг/т чугуна, то настройки должны иметь следующий вид (рис. П. 6.3).

Окно настроек Допустимые отклонения	
Расход кокса, кг/т чугуна	1
Температура фурменного очага, С	50
Кремний в чугуне, %	0,05
Производительность, т/сутки	20
Индекс верхней тепловой зоны	0,05
Индекс нижней тепловой зоны	0,05
Выход шлака, кг/т чугуна	5
Функция оптимальности, %	0,1

Рис. П. 6.3. Задание допустимого отклонения для расхода кокса

Интервал для температуры фурменного очага задается также, при помощи целевого значения и допустимого отклонения. В приведенном примере он составляет 2250 ± 50 °С, т. е. 2200-2300 °С.

Требование минимизации расхода кокса

Для поиска решений, которые должны удовлетворять требованию минимизации расхода кокса, необходимо отметить соответствующее требование в нижней правой части основного окна (рис. П. 6.4).

Критерии оптим. и их весовые коэффициенты	
<input checked="" type="checkbox"/> Минимальный расхода кокса	1
<input type="checkbox"/> Максимальная производительность	
<input type="checkbox"/> Минимальный выход шлака	

Рис. П. 6.4. Условие минимизации расхода кокса

Задание значений входных величин

Управляющие переменные могут быть заданы числом или интервалом. Управляющая переменная задается относительно ее базового значения. Возможно три варианта:

- не меняется – новое значение совпадает с базовым;
- меняется – конкретное численное значение, отличное от базового;
- диапазон – интервал, в котором может находиться входная переменная (рис. П. 6.5).

Рис. П. 6.5. Задание изменения управляющей переменной

Примечание 3: задание выходных значений осуществляется при помощи ввода целевого значения в главном окне программы и допустимых отклонений в окне настроек.

Примечание 4: При задании ограничений на управляющие параметры необходимо учитывать допустимые пределы изменения управляющих параметров, имеющиеся в теоретическом материале.

Примечание 5: После задания всех параметров в основном окне программы необходимо сохранить внешний вид окна для отчета.

6. Запустить расчет. Для первой задачи можно переходить к следующему пункту. Для второй задачи необходимо воспользоваться полученными рекомендациями по изменению одной входной величины в соответствии с условием ситуации *а*. Это делается при помощи задания диапазона изменения - от допустимого минимального до текущего при необходимости снижения; от текущего до допустимого максимального при необходимости повышения.

7. Получить численный результат. Выбрать один вариант из набора решений, если их несколько. Обосновать выбор.

8. Повторить действия 5-7 для ситуации *б*.

9. Повторить действия 1-8 для второй задачи вашего варианта. При этом используется другая печь, необходимо заменить файл с настройками модели в соответствии с вариантом.

3.5. Содержание отчета

- 1 Фамилия студента, группа. Название и цель работы.
2. Для каждой из 4-х ситуаций (две задачи, ситуации а и б в каждой) следующие данные:
 - условие задачи;
 - значение константы K_{co} для данной задачи;
 - заданные исходные данные в основном окне программы, позволяющие получить искомый результат;
 - результаты расчетов; выделенный вариант, который вы считаете предпочтительным, обоснование выбора этого варианта.

Краткие биографические данные об авторах

В.Г. Лисиенко



Вице-президент АИН, президент РУО АИН, академик АИН им. А.М. Прохорова, Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Правительства РФ, профессор, д-р техн. наук, бывший заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах» ИРИТ-РТФ, в настоящее время – профессор департамента Информационных технологий и автоматике ИРИТ-РТФ.

Лисиенко В.Г. родился 07.11.1933 г. в Донецкой области, Авдеевском районе, село Н. Бахмутовка. Окончил с отличием Уральский политехнический институт (1956), инженер-металлург, канд. техн. наук (1962) «Исследование элементов конструкций форсунок высокого давления для мартеновских печей»; д-р техн. наук (1972 г. «Исследование светящегося факела и процессов теплообмена в условиях высокотемпературных металлургических печей», профессор (1974).

В 1952 г. - подручный сталевара. С 1956 г. работает в Уральском политехническом институте (УГТУ-УПИ, УрФУ). На металлургическом факультете 1956 - 1959 г.г. - мл. научный сотрудник. 1962 - 1974 г.г. - доцент 1974 - 1982 г.г. - профессор. На радиотехническом факультете: с 1982 г. - заведующий кафедрой аппаратуры автоматического управления (автоматики и управления в технических системах), профессор департамента Информационных технологий и автоматике ИРИТ-РТФ.

С 1965 по 1969 г.г. - зам. декана на металлургическом факультете. С 1975 по 1988 г.г. - проректор УПИ по научной работе. Как проректором им много сделано по развитию тематики важнейших исследований и внедрению их результатов в промышленность, по увеличению объемов важнейших госбюджетных и хоздоговорных

НИР, по созданию 14 новых проблемных и отраслевых лабораторий, межвузовского экспериментального центра научных исследований по развитию экспериментальной и производственной баз вуза. С 1999 г. - научный руководитель Института проблем энергосбережения и автоматики при УГТУ-УПИ.

С 1994 г. - вице-президент Академии инженерных наук и президент Регионального Уральского отделения АИН.

Создатель известной в нашей стране и за рубежом научной школы по управлению и совершенствованию высокотемпературных энерготехнологических процессов на основе математического моделирования интегрированного энерго-экологического анализа, экспертных систем и интеллектуальных датчиков. Подготовил 40 кандидатов и 5 докторов наук. 1995, 1998, 2002, 2003, 2006 и 2007 г.г. - стажировки, работа и международные конгрессы в США. Пурдье-Университет (Вест-Лафайетт). Институт Технологий Газа (Чикаго). Автор более 1200 трудов, в том числе 24 монографии и справочных изданий. 22 учебников и учебных пособий. 144 патента и авторских свидетельств на изобретения, в том числе зарубежных научный редактор многих монографий и сборников трудов.

Участник многих зарубежных конгрессов и конференций, в том числе симпозиум ИФАК (1967, Прага), XI международный газовый конгресс (1970 Москва), конгрессы ИФАК (1978, Хельсинки, Финляндия; 1981, Киото Япония), международный семинар (1987, Киев), международные конференции по теплообмену (1988, 1992, Минск), конференция «Термо-96» (1996, Будапешт, Венгрия), американская конференция по исследованию пламени (1996, Мерилэнд), VI Международный форум по информационным технологиям (1999, Кемер, Турция), Международный конгресс по исследованию машин и механизмов (2004, Хуанг, Китай), конгрессы американского общества инженеров-механиков (2006, ASME, Чикаго, 2007 ASME, Сиэтл, США) и др.

Был депутатом Кировского районного совета депутатов трудящихся (1982 -1985 г.г.), членом редакции журналов «Известия вузов и энергетических объединений СНО энергетики» и «Энергоанализ и энергосбережение»; членом правления союза предприятий малого и среднего бизнеса Свердловской области, членом Попечительского совета фонда «Инновационные технологии», членом Россий-

ского национального комитета по автоматическому управлению, членом Екатеринбургского союза НИО. В течение 10-ти лет - член экспертного совета и председатель по защитах докторских диссертаций, председатель совета по защитах кандидатских диссертаций. В УГТУ-УПИ – был членом НТК и членом наградной комиссии. Главный редактор журнала «Промышленные печи и трубы», член исполкома международной ассоциации «Знание».

«Заслуженный деятель науки и техники РФ» (1991), Лауреат премии Правительства Российской Федерации (1998), Лауреат конкурса энергетического центра ЕС (1995), Лауреат конкурса по энергосбережению и автоматизации технологических процессов металлургических и горнорудных предприятий (2002), Лауреат премии Большой золотой медали 60 лет международной ассоциации «Знание» (2008). Почетный профессор УГТУ-УПИ (2000). Награжден орденами «Знак почета» (1985) и «Почета» (2003), медалями «Ветеран Труда», им. К.Э. Циолковского, М.В. Келдыша, В.Е. Грум-Гржимайло, А.С. Попова, А.М. Прохорова, золотой медалью им. В.Г. Шухова, серебряной медалью Кембриджа «Выдающийся ученый XXI века», серебряной и двумя бронзовыми медалями ВДНХ, грант президента РФ по поддержке молодых ученых и их научных руководителей, почетное звание и знак «Рыцарь науки и искусства», трижды (2005 - 2007) удостоен золотой медали «СВЯЗЫПРОМЭКСПО», почетный выпускник УГТУ-УПИ, удостоен многих почетных грамот и благодарностей.

Ю.В. Крюченков



Юрий Владимирович Крюченков родился 26 сентября 1953 года в городе Свердловске. В школьные годы, как и большинство визовских мальчишек, начал заниматься парусным спортом. Неоднократно становился призером чемпионата России среди юношей.

После окончания в 1970 году средней школы № 9 он поступил в Уральский политехнический институт имени С. М. Кирова и с отличием окончил его в 1975 году по специальности «инженер-металлург». В этом же году

Ю. В. Крюченков был принят на работу в УПИ, где прошел трудовой путь от инженера кафедры металлургических печей до заместителя директора Научно-исследовательского института проблем энергосбережения и автоматизации Уральского государственного технического университета — УПИ. Во время учебы в УПИ стал кандидатом в мастера спорта и членом сборной команды России по парусному спорту.

В 1982 году Ю. В. Крюченков успешно окончил аспирантуру УГТУ-УПИ, защитив диссертацию на звание кандидата технических наук по специальности «Черная металлургия». Юрий Владимирович успешно сочетает свою профессиональную деятельность со спортивными и научными достижениями. В 1990 году он организовал Научно-производственное объединение «Коматек». В настоящее время «Коматек» — широкопрофильное НПО, которое сотрудничает с предприятиями металлургической, машиностроительной и химической промышленности России и является спонсором парусных гонок мирового уровня.

Ю. В. Крюченков — яхтсмен с многолетним стажем, основоположник зарождения парусного спорта в городе Екатеринбурге. С 1966 года он неизменно является членом сборной команды Свердловской области, участником, призером, победителем многих российских и международных соревнований. С 1982 года — мастер спорта.

Ю. В. Крюченков — вице-президент Всероссийской федерации парусного спорта, председатель совета Свердловского регионального отделения ВДО «Спортивная Россия», неизменный организатор самых крупных в Восточной Европе парусных соревнований «Ява-Трофи».

Вся его научная и производственная деятельность связана с развитием и внедрением новых перспективных направлений наук и техники на предприятиях Уральского региона. Автор более 50 научных работ, учебных пособий, имеет 10 авторских свидетельств. В 2001 году за большой вклад в развитие науки и техники награжден медалью имени академии М. В. Келдыша. В 2002 году за работу «Комплекс учебно-научной литературы по проблемам информационно-измерительных технологий, моделирования и управления энергетическими и металлургическими агрегатами» награжден премией-медалью имени профессора А. С. Попова. В этом же году защитил докторскую диссертацию. В 2003 году избран действительным членом Академии инженерных наук Российской Федерации. В течение пяти лет работал генеральным директором Центрального стадиона города Екатеринбурга. В 2006 году Ю. В. Крюченков был награжден Почетной грамотой Законодательного собрания Свердловской области. С 2011 года по настоящее время является председателем Олимпийского совета Свердловской области.

Оглавление

стр.

18.1. Введение. Исторические аспекты.....	3
18.2. Трехуровневые АСУ ТП (ТС) и сложные объекты с распределенными параметрами	16
18.2.1. Развитие и структура ТАСУ ТП.....	16
18.2.2. Обобщенный термодинамический подход при моделировании объектов с распределенными параметрами	26
18.2.3. Неравновесность и самоорганизация (в рамках синергетики) – проблемы управления в сложных объектах	30
18.3. Совершенствование систем управления магнитным обогащением железных руд и термообработки железорудных окатышей	43
18.3.1. Управление процессом магнитного обогащения железных руд....	43
18.3.2. Системы управления производством железорудных окатышей ...	50
18.4. Разработка и применение системы «Гранулометр» для контроля и автоматизации процесса окомкования и дробления рудных материалов ...	95
18.4.1. Определение грансостава сырых окатышей на обжиговых конвейерных машинах	95
18.4.2. Математическое описание грансостава и производительность гранулятора	107
18.4.3. Постановка и реализация системы автоматического управления размером окатышей	113
18.4.4. Определение размеров дробленого (сыпучего) материала	121
18.5. Развитие экспертных (прогнозных) систем управления доменным процессом и процессом плавки в жидкой ванне	134
18.5.1. Экспертные системы и трехуровневые АСУ ТП	134
18.5.2. Диагностика воздействий на тепловое состояние доменной печи..	148
18.5.3. Логические экспертные системы доменной печи и агрегата ПЖВ....	157
18.5.4. Количественные модели экспертной системы доменной печи	201
18.5.5. Способ связного автоматического управления подачей энергоносителей в доменную печь.....	221
18.5.6. Противоаварийная экспертная система доменной печи.....	244
18.5.7. Экспертная система, основанная на математической модели реального времени	247
18.5.8. Развитие логико-количественных и модельно-количественных экспертных систем	296

18.5.9. Моделирование и диагностика использования пылеугольного топлива в доменной печи	300
18.5.10. Прогнозные оценки параметров процесса получения высокофосфористого чугуна с прямым легированием редкоземельными элементами (РЗМ)	319
18.5.11. Экспертная тестовая система оценки персонала – специалистов доменного производства	326
18.6. Управление, контроль и диагностика применительно к сталеплавильным агрегатам	340
18.6.1. Управление плавкой	340
18.6.2. Экспертная система управления процессом горения	342
18.6.3. Акустический способ температурной диагностики расплавов	347
18.6.4. Диагностика и идентификация тепловых динамических характеристик в рабочем пространстве сталеплавильных печей	365
18.6.5. Диагностика процесса плавления в дуговой электрической печи с использованием металлизированных окатышей	404
18.6.6. Автоматизированная обработка при разливке металла	416
18.7. Управление, контроль и диагностика применительно к плавильным агрегатам цветной металлургии	420
18.7.1. Контроль и управление в процессах вакуумного дугового переплава	420
18.7.2. Управление процессом вакуумного дугового переплава	428
18.7.3. Автоматизированная система диагностики и управления качеством продукции в процессе непрерывного литья заготовок	447
18.7.4. Автоматизированная система управления газоочистными установками при производстве алюминия	464
18.7.5. Система управления тепловым режимом в комплексе «печь автогенной плавки – котел–утилизатор»	483
18.8. Контроль, диагностика, автоматизация и уточненные методы расчета в нагревательных устройствах	490
18.8.1. Форсирование тепловых работ проходной нагревательной печи и оптимальное управление тепловым режимом	490
18.8.2. Параметрическая настройка модели оценки теплового состояния проходных нагревательных печей	518
18.8.3. Динамическая оптимизация процесса нагрева движущегося металла	525

18.8.4. Развитие структуры трехуровневой АСУ нагревом металла.....	539
18.8.5. Совершенствование системы управления и конструкций проходных термических печей	548
18.8.6. Автоматизация теплового режима камерной термической печи с импульсным отоплением	563
18.8.7. Управление нагревом в электрической печи сопротивления с детерминированным адаптивным регулятором	596
18.8.8. Диагностика режимов нагрева металла в печах камерного типа..	610
18.8.9. Автоматизированная система управления комплексом термоупрочнения арматуры	619
18.8.10. Диагностика появления брака в процессе изготовления топливных таблеток.....	627
18.8.11. Струйно-факельные воздушнонагреватели, система автоматизации и температурная стабилизация вентиляционного воздуха в шахтах	634
18.8.12. Система удаленного мониторинга и управления.....	650
18.8.13. Практические внедренческие разработки АСУ нагревом.....	658
18.9. Управление энергоресурсами и энергоустановками.....	661
18.9.1. Система управления энергоресурсами – сквозная и динамическая энергоемкость.....	661
18.9.2. Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в энергонасыщенных комплексах.....	673
18.9.3. Алгоритмическое, программное и приборное обеспечение учета расходов теплоносителя и тепловой энергии.....	696
18.9.4. Система управления освещением на примере промышленного предприятия.....	714
18.9.5. Концептуальное моделирование, техническая диагностика и вибромониторинг энергетических объектов	724
18.9.6. Источник питания для установки электронного лучевого переплава	746
18.9.7. Особо чистый водород.....	748
18.9.8. Развитие энергометаллургического комплекса и АСУ ТП комплекса	755
18.9.9. Использование плазменных, акустических и индукционных эффектов при управлении в новых технологиях обработки материалов	764
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	771
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	806

ПРИЛОЖЕНИЯ.....	807
Приложение 1. Система удаленного мониторинга и управления АСУ ТП	808
Приложение 2. Акт использования	810
Приложение 3. Рецензия на магистерскую диссертацию	811
Приложение 4. Heat Transfer Seminar.....	812
Приложение 5. Пример выполнения лабораторной работы по дисциплине «Математическое моделирование и управление в энерготехнологиях»	813
Приложение 6. Пример выполнения лабораторной работы по дисциплине «Идентификация и управление в сложных саморегулирующихся системах»	831
Приложение 7. Краткие биографические данные об авторах.....	846

Монография

Владимир Георгиевич Лисиенко
Юрий Владимирович Крюченков

**Автоматизированное управление, информатика
и диагностика, методы и средства, включая
локальные САР, летательный и наземный
транспорт**

**Автоматизированное управление, информатика и
диагностика. Технологические процессы и энергетика**

Том 3
Книга 1

Компьютерный набор *Т.В. Лобановой*
Компьютерная верстка *Ю.Б. Швецовой*

Подписано в печать 24.07.2017. Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 53,1. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Заказ № 5989. Тираж 120 экз.

Отпечатано в типографии
ООО "Издательство УМЦ УПИ"
г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф.2
Тел.: (343) 362-91-16